

Профессор

**И.Н.Бекман**

Курс лекций

# **ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**

## **Лекция 1. ИСТОРИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Издавна человек стремился познать окружающий его сложный и многообразный мир. Исследования шли в трёх направлениях:

1. Поиск элементарных составляющих, из которых образована вся окружающая материя.
2. Изучение сил, связывающих элементарные составляющие материи.
3. Описание движения частиц под действием известных сил.

Остановимся на роли ядерной физики в познании строения материи.

### **1. ПРЕДЫСТОРИЯ**

В течение столетий (можно сказать – тысячелетий) в науке царствовала гипотеза о неделимости и «бесструктурности» атома. Первая реальная угроза этой гипотезе возникла в другой сфере – в теории электричества. В 1749 Бенджамин Франклин высказал гипотезу, что электричество представляет собой своеобразную материальную субстанцию. В его работах Франклина впервые появляются термины: заряд, разряд, положительный заряд, отрицательный заряд, конденсатор, батарея, частицы электричества. Термин «электрон» как название фундаментальной неделимой единицы заряда в электрохимии предложен Дж. Дж. Стоуни в 1894 (сама единица была введена им в 1874). Открытие электрона как частицы принадлежит Дж. Дж. Томсону, который в 1897 установил, что отношение заряда к массе для катодных лучей не зависит от материала источника. Майкл Фарадей ввёл термин «ион» для носителей электричества в электролите и предположил, что ион обладает неизменным зарядом. Г. Гельмгольц в 1881 показал, что концепция Фарадея должна быть согласована с уравнениями Максвелла. Дж. Стоней в 1881 году впервые рассчитал заряд одновалентного иона при электролизе, а в 1891 году, предложил термин «электрон» для обозначения электрического заряда одновалентного иона при электролизе.

Открыт электрона - носителя отрицательного элементарного электрического заряда – и ионов однозначно свидетельствовало о сложном строении атома и возможности развала его на отдельные составляющие.

В открытии первой элементарной частицы – электрона заметную роль сыграли катодные лучи. Катодные лучи открыты в 1859 Юлиусом Плюккером, название дано Э. Гольдштейном, который высказал волновую гипотезу: катодные лучи представляют собой процесс в эфире. Английский физик В. Крук высказал идею, что катодные лучи это потоки частичек вещества. В 1895 году французский физик Жан Перрен экспериментально доказал, что катодные лучи — это поток отрицательно заряженных частиц, которые движутся прямолинейно, но могут отклоняться магнитным полем.

С 1895 года Джозеф Джон Томсон в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета начинает методическое количественное изучение отклонения катодных лучей в электрических и магнитных полях. Работал он с трубкой Гейслера. Итоги этой работы были опубликованы в 1897 в октябрьском номере журнала "Philosophical Magazine". В своем опыте Томсон доказал, что все частицы, образующие катодные лучи, тождественны друг другу и входят в состав вещества. Суть опытов и гипотезу о существовании материи в состоянии ещё более тонкого дробления, чем атомы, Томсон изложил на вечернем заседании Королевского общества 29.04. 1897. Извлечение из этого сообщения было опубликовано в "Electrician" 21.05.1897. Электрический заряд электрона измерен Р. Милликеном в 1912.

Открытие второй элементарной частицы, важной для строения ядра, – протона - сильно задержалось и было сделано Резерфордом в 1919, хотя ион  $H^+$  был к этому времени давно известен.

Изучение катодных лучей с помощью трубки Крукса привело к открытию В.Рентгеном X-лучей, в некоторых странах, в том числе – России называемых рентгеновским излучением. Статья Рентгена под названием «О новом типе лучей» была опубликована 28.12.1895.

20.01.1896 Анри Пуанкаре на заседании Парижской Академии рассказал об открытии новых лучей, продемонстрировал рентгеновские снимки и высказал предположение, что рентгеновское излучение связано с флюоресценцией и, возможно, возникает всегда в люминесцирующих веществах и никакой катодной трубки для получения X-лучей не надо. Среди участников заседания был Анри Беккерель, отец и дед которого - оба физики - в свое время занимались флюоресценцией и фосфоресценцией. Беккерель решил проверить гипотезу Пуанкаре. Он взял из коллекции минералов своего отца двойной сульфат уранила калия. Обернув фотопластинку чёрной бумагой, он положил на неё металлическую пластинку причудливой формы, покрытую слоем урановой соли, и выставил на несколько часов на яркий солнечный свет. После проявления пластинки на ней было отчетливо видно изображение металлической фигуры, той самой фигуры, которая покрывалась до опыта солью урана. Повторные опыты Беккереля дали аналогичный результат, и 24.02.1896 он доложил академии о результатах опытов. Казалось, что гипотеза Пуанкаре полностью подтверждается. Но осторожный Беккерель решил поставить контрольные опыты. К концу февраля он приготовил новую пластинку. Но погода была пасмурной и оставалась такой до 1 марта. Утро 1 марта было солнечным, и опыты можно было возобновить. Беккерель решил, однако, проявить пластинки, лежавшие несколько дней в темном шкафу. На проявленных пластинках четко обозначились силуэты образцов минералов, лежавших на непрозрачных экранах пластинок. Так было открыто явление радиоактивности – свойство некоторых элементов самопроизвольно распадаться. Через два года Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри открыли радиоактивность тория и выделили из солей урана полоний и радий, радиоактивность которых оказалась в миллионы раз сильнее радиоактивности урана и тория. Понятие радиоактивности ввела Мария Кюри в 1901.

После того, как в руках исследователей появились мощные источники радиации, в миллионы раз более сильные, чем уран (это были препараты радия, полония, актиния), были начаты детальные изучения свойств радиоактивного излучения. В первых исследованиях на эту тему самое активное участие приняли Эрнест Резерфорд супруги Мария и Пьер Кюри, А.Беккерель, многие другие. Прежде всего, была изучена проникающая способность лучей, а также действие на излучение магнитного поля. Оказалось, что излучение неоднородно, а представляет собой смесь «лучей». Пьер Кюри обнаружил, что при действии магнитного поля на излучение радия одни лучи отклоняются, а другие нет. Было известно, что магнитное поле отклоняет только заряженные летящие частицы, причем положительные и отрицательные в разные стороны. По направлению отклонения убедились в том, что отклоняемые  $\beta$ -лучи заряжены отрицательно. Дальнейшие опыты показали, что между катодными и  $\beta$ -лучами нет принципиальной разницы, откуда следовало, что они представляют собой поток электронов.

Отклоняющиеся лучи обладали более сильной способностью проникать через различные материалы, тогда как неотклоняющиеся легко поглощались даже тонкой алюминиевой фольгой – так вело себя, например, излучение нового элемента полония – его излучение не проникало даже сквозь картонные стенки коробки, в которой хранился препарат. При использовании более сильных магнитов оказалось, что  $\alpha$ -лучи тоже отклоняются, только значительно слабее, чем  $\beta$ -лучи, причем в другую сторону. Отсюда следовало, что они заряжены положительно и имеют значительно бóльшую массу (как потом выяснили, масса  $\alpha$ -частиц в 7740 раз больше массы электрона). Впервые это явление обнаружили в 1899 А.Беккерель и Ф.Гизель. В дальнейшем Резерфорд с коллегами показал, что  $\alpha$ -частицы представляют собой ядра атомов гелия (нуклид  ${}^4\text{He}$ ) с зарядом +2 и массой 4 у.е.. Когда же в 1900 французский физик Поль Вийар исследовал более подробно отклонение  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучей, он обнаружил в излучении радия и третий вид лучей, не отклоняющихся в самых сильных магнитных полях, это открытие вскоре подтвердил и Беккерель. Этот вид излучения, по аналогии с альфа- и бета-лучами, был назван гамма-лучами, обозначение разных излучений первыми буквами греческого алфавита предложил Резерфорд. Гамма-лучи оказались сходными с лучами Рентгена, т.е. они представляют собой электромагнитное излучение, но с более короткими длинами волн и соответственно с большей энергией. Все эти виды радиации описала М.Кюри в своей монографии «Радий и радиоактивность» (1904).

Теоретическое объяснение причин радиоактивного распада и идентификацию источников ионизирующих излучений было получено в рамках возникшей и развивающейся в это же время "новой физики", в основу которой легли две фундаментальные теории: теория относительности и квантовая теория. Именно они стали фундаментом, на котором построено описание явлений микромира и на котором базируется ядерная физика.

Создание А.Эйнштейном в 1905 году теории относительности привело к радикальному пересмотру представлений о свойствах пространства и времени, взглядов на характер электромагнитного поля. В основу

теории относительности положены две физические концепции: 1) равномерное и прямолинейное движение тел не влияет на происходящие в них процессы; существует предельная скорость распространения взаимодействия - скорость света в пустоте. Существование предельной скорости распространения взаимодействия означает, что существует связь между пространственными и временными интервалами.

В 1900 опубликована работа М. Планка, посвященная проблеме теплового излучения тел. М.Планк моделировал вещество как совокупность гармонических осцилляторов различной частоты. Предположив, что излучение происходит не непрерывно, а порциями - квантами, он получил формулу для распределения энергии по спектру теплового излучения, которая хорошо согласовывалась с опытными данными. В формулу вошла новая фундаментальная константа - постоянная Планка. Гипотеза Планка о квантовой природе теплового излучения противоречит основам классической физики и показала границы ее применимости. Через пять лет А.Эйнштейн, обобщив идею М.Планка, показал, что квантованность является общим свойством электромагнитного излучения. Согласно идеям А.Эйнштейна электромагнитное излучение состоит из квантов, названных позднее фотонами, причём каждый фотон имеет определенную энергию и импульс.

Представления о квантованности электромагнитного излучения позволили объяснить закономерности фотоэффекта, исследованные экспериментально Г.Герцем. На основе квантовой теории А.Комптоном в 1922 было объяснено явление упругого рассеяния электромагнитного излучения на свободных электронах, сопровождающееся увеличением длины волны света. Открытие двойственной природы электромагнитного излучения - корпускулярно-волнового дуализма оказало значительное влияние на развитие квантовой физики, объяснение природы материи. В 1924 Луи де Бройль выдвинул гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Согласно этой гипотезе не только фотоны, но и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также и волновыми свойствами.

Экспериментальное подтверждение идеи корпускулярно-волнового дуализма привело к пересмотру привычных представлений о движении частиц и способа описания частиц. Для классических материальных точек характерно движение по определенным траекториям, так, что их координаты и импульсы в любой момент времени точно известны. Для квантовых частиц это утверждение неприемлемо, так как для квантовой частицы импульс частицы связан с ее длиной волны, а говорить о длине волны в данной точке пространства бессмысленно. Поэтому для квантовой частицы нельзя одновременно точно определить значения ее координат и импульса. Если частица занимает точно определенное положение в пространстве, то её импульс полностью не определен и наоборот, частица с определенным импульсом имеет полностью неопределенную координату. Неопределенность в значении координаты частицы  $\Delta x$  и неопределенность в значении компоненты импульса частицы  $\Delta p_x$  связаны соотношением неопределенности, установленным В.Гейзенбергом в 1927:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx \hbar$$

Но главное достижение теории этого периода – получение формулы, связывающей массу вещества с его энергией (которую не совсем справедливо называют формулой Эйнштейна):

$$E=mc^2=hc/\lambda$$

Именно эта формула превратила частную науку – ядерную физику – в глобальную, обеспечила создание ядерного оружия и атомной энергетики.

Замечание. Закон взаимосвязи массы и энергии  $E=mc^2$  введён Эйнштейном в рамках специальной теории относительности (1905). Однако сходные или даже такие же формулы обнаружены историками науки в более ранних работах Хевисайда (1890), Дж. Дж. Томсона (1881), Анри Пуанкаре (1900) и Ф. Газенорля (1904). Все эти исследования относились к частному случаю - к предполагаемым свойствам эфира или заряженных тел. Эйнштейн первый представил это соотношение как всеобщий закон динамики, относящийся ко всем видам материи и не ограниченный электромагнетизмом. Кроме того, большинство перечисленных учёных связывали этот закон с существованием особой «электромагнитной массы», зависящей от энергии. Эйнштейн объединил все виды масс и отметил обратную зависимость: инертность любого физического объекта растёт с ростом энергии.

## 2. НАЧАЛО ИСТОРИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Одна из первых моделей атома была предложена в 1904 Дж. Томсоном. Согласно модели Дж. Томсона атом представлял собой нейтральную систему, состоящую из заряженного шара с зарядом  $+Ze$ , внутри которого в определенных равновесных положениях находятся  $Z$  отрицательно заряженных электронов. Размер атома  $\sim 10^{-8}$  см. Прямые экспериментальные исследования строения атома были выполнены в 1911 Э.Резерфордом, который изучал рассеяние  $\alpha$ -частиц при прохождении через тонкую фольгу. Угловое распределение  $\alpha$ -частиц, рассеянных на золоте, свидетельствовало о том, что положительный заряд атома сосредоточен в пространственной области размером меньше  $10^{-12}$  см. Это явилось основанием для планетарной модели атома Резерфорда, согласно которой атом состоит из тяжелого положительно

заряженного атомного ядра с радиусом меньше  $10^{-12}$  см и вращающихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Размер атома определяется размерами его электронной оболочки и составляет  $\sim 10^8$  см, что в десятки тысяч раз превышает размер атомного ядра. Несмотря на то, что атомное ядро занимает лишь небольшую часть объема атома в нем сосредоточено 99,98% его массы.

Предложенная Э. Резерфордом модель атома сыграла решающую роль в развитии квантовой механики. Дело в том, что на основе классической физики невозможно было объяснить наблюдаемую на опыте устойчивость атома. Вращающиеся на орбите электроны, согласно классической физике, должны были излучать энергию и, потеряв её, упасть на атомное ядро. Поскольку такие явления как фотоэффект и явление дифракции электронов удалось объяснить с помощью квантовых представлений, вполне разумно казалось попытаться с помощью такого подхода объяснить и устойчивость электронных орбит атома.

В 1913 Н. Бор предложил новую квантовую теорию орбит. Согласно этой теории электрон может вращаться вокруг ядра неопределенно долго, не излучая энергию, если на его орбите укладывается целое число длин волн де Бройля. Атом может перейти из одного состояния в другое, испустив квант энергии – фотон.

Первую искусственную трансмутацию элементов осуществил в 1918-19 Э. Резерфорд. Им проведена первая искусственная реакция – превращение азота в кислород при облучении азота  $\alpha$ -частицами (реакция  $^{14}\text{N}(n,p)^{17}\text{O}$ ). Попутно был открыт протон. В дальнейшем Резерфорду удалось вызвать ядерные реакции в 17 легких элементах. В их числе были бор, фтор, натрий, алюминий, литий, фосфор. Во многих продуктах расщепления имелся протон. Резерфорд назвал эту элементарную частицу протоном. Он высказал предположение, что протоны входят в состав всех атомных ядер. С 1925, после создания ускорителя – каскадного генератора (Дж. Кокрофт, Э. Уолтон), ядерные реакции под действием ускоренных протонов стали активно использоваться для трансмутации элементов.

После открытия протона было высказано предположение, что ядра атомов состоят из одних протонов. Однако это предположение оказалось несостоятельным, так как отношение заряда ядра к его массе не остается постоянным для разных ядер, как это было бы, если бы в состав ядер входили одни протоны. Для более тяжелых ядер это отношение оказывается меньше, чем для легких, т. е. при переходе к более тяжелым ядрам масса ядра растет быстрее, чем заряд. В 1920 Резерфорд высказал гипотезу о существовании в составе ядер жестко связанной компактной протон-электронной пары, представляющей собой электрически нейтральное образование – частицу с массой, приблизительно равной массе протона. Он даже придумал название этой гипотетической частице – нейтрон. Эта гипотеза получила название протон-электронной модели ядра. Экспериментальные факты не подтвердили эту модель.

Новый скачок в развитии модели ядра связан с открытием нейтрона. В 1930 Вальтер Боте и Г. Бекер, работавшие в Германии, обнаружили, что если высокоэнергетичные альфа-частицы, испускаемые полонием попадают на некоторые легкие элементы, в особенности на бериллий или литий, образуется излучение с необычно большой проникающей способностью. Сначала считалось, что это – гамма-излучение, но выяснилось, что оно обладает гораздо большей проникающей способностью, чем все известные гамма-лучи и результаты эксперимента не могут быть таким образом интерпретированы. Важный вклад сделали в 1932 Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Они обнаружили, что если это неизвестное излучение направить на парафин или любое другое соединение, богатое водородом, то образуются протоны высоких энергий. Само по себе это ничему не противоречило, но численные результаты приводили к нестыковкам в теории. Позднее в том же 1932 английский физик Джеймс Чедвик провел серию экспериментов (по реакции  $^9_4\text{Be} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}$ ), в которых он показал, что гамма-лучевая гипотеза несостоятельна. Он предположил, что это излучение состоит из незаряженных частиц с массой близкой к массе протона, и произвел серию экспериментов, подтвердивших эту гипотезу. Эти незаряженные частицы были названы нейтронами от латинского корня *neutral* и обычного для частиц суффикса *on* (он).

Измерения масс атомов с помощью масс-спектрографа Ф. Астона показали, что массы всех исследованных атомов с точностью  $\sim 10\%$  пропорциональны массе протона -  $M \sim Am_p$ , где  $A$  принимает только целочисленные значения. Этот факт послужил основанием для создания протон-электронной модели атомного ядра. В этой модели предполагалось, что атомное ядро состоит из  $A$  протонов и  $(A-Z)$  электронов. В этой модели легко объяснялись обнаруженная Астоном пропорциональность массы атомного ядра числу  $A$  и величина заряда атомного ядра. Однако, по мере накопления экспериментальных данных по массам атомных ядер, магнитным моментам и спинам атомных ядер, протон-электронная модель ядра начала сталкиваться с трудностями в объяснении экспериментальных данных. Тем не менее, протон-электронная модель ядра продержалась вплоть до 1932 года.

К 1932 выяснилось, что гипотеза строения ядра из протонов и электронов, объяснившая такие характеристики ядра, как массовое число  $A$  и заряд  $Z$ , находится в противоречии с экспериментальными фактами, относящимися к спинам и магнитным моментам ядер. Ещё в 1924 до открытия спина В. Паули предположил, что ядро обладает магнитным моментом, влияющим на движение орбитальных электронов и тем самым создающим сверхтонкую структуру спектральных линий. Объяснение тонкой структуры спектров наличием обусловленных спином магнитных моментов ядер привело к разделению ядер на два типа. Ядра чётного типа, обладающие целым спином, подчиняются статистике Бозе, ядра нечётного типа, обладающие полуцелым спином, подчиняются статистике Ферми - Дирака. Поэтому по протонно-электронной теории ядра, состоящие из чётного числа электронов и протонов, должны подчиняться статистике Бозе, из нечётного - статистике Ферми - Дирака. В 1930 выяснилось, что ядро азота подчиняется статистике Бозе, хотя оно согласно протонно-электронной теории строения ядра состоит из 21 частицы (14 протонов, 7 электронов). Этот факт получил в науке название азотной катастрофы. Выход нашёл Вернер Гейзенберг, который предположил, что ядро состоит из протонов и нейтронов. Эти частицы получили общее наименование нуклонов.

С 1932 начинают осуществляться первые ядерные превращения под действием нейтронов (Н. Фезер, Л. Мейтнер, У. Харкинс). В том же году проводится первая ядерная реакция с искусственно ускоренными протонами – трансмутация ядер лития в гелий. Ядерные реакции под действием ускоренных протонов и дейтронов. Первая реакция ядерного синтеза ( $d-d$ - реакция), открытие трития и гелия-3 (М. Олифант, П.Хартек, Э.Резерфорд).

Значительный вклад открытие новых ядерных процессов внесли супруги И. и Ф. Жолио-Кюри, Э.Ферми, О.Хан, Л.Мейтнер и др. Ядерные реакции обеспечивают превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами, гамма-квантами или друг с другом. В 1933 продемонстрирована возможность получения мощных источников быстрых нейтронов при помощи ускорителей; открыты ( $d, n$ ) и ( $p, n$ ) реакций (Ч.Лауритсен). В 1934 предсказаны цепные ядерные реакции (на примере бериллия, Л.Сциллард).

В 1934 происходит важное событие - открытие искусственной радиоактивности (И. и Ф. Жолио-Кюри). Облучая  $\alpha$ -частицами от мощного источника полония бор и алюминий они обнаружили превращение их в новые изотопы азота и фосфора, оказавшимися позитронными излучателями (например,  ${}_{13}^{27}Al + {}_2^4He \rightarrow {}_{15}^{30}P + {}_0^1n$  радиоактивный  ${}^{30}P$  превращался путём позитронного распада в стабильный  ${}^{30}Si$  с периодом полураспада 3 мин 15 с). Одновременно начинается активное изучение ядерных реакций под действием нейтрона, происходит открытие явления замедления нейтронов в веществе, и намечаются перспективы использования тепловых нейтронов для ядерной трансмутации. (Э.Ферми). В том же году открывается радиационный захват - захват нейтрона протоном с испусканием гамма-кванта (Д.Ли), процесс расщепление бериллия гамма-квантами (Л. Сциллард, Т. Чалмерс) – фотоядерная реакция, ядерный фотоэффект – фоторасщепление дейтрона (Дж. Чэдвик, М. Гольдхабер) и ядерная реакция срыва (Р. Оппенгеймер, М. Филлипс).

В 1935 становится ясным резонансный характер взаимодействия медленных нейтронов с ядрами (П. Мун, Дж. Тильман). В 1936 предложена дисперсионная формула ядерных реакций (Г. Брейт, Ю. Вигнер).

В 1932 в составе космических лучей была открыта еще одна элементарная частица - позитрон. В 1929 Д. В. Скобельцын применил для исследования космических лучей камеру Вильсона, помещенную в магнитное поле и доказал, что в составе космического излучения имеются заряженные частицы - электроны. Он обнаружил слабо изогнутые магнитным полем следы таких электронов. На его фотографиях были и следы, слабо изогнутые в противоположную электронам сторону, однако с уверенностью сказать что-либо определенное о частицах, оставивших эти следы, Скобельцын не мог. В 1932 американский физик К. Андерсон применил для исследования космических лучей сильное магнитное поле. Он обнаружил изогнутые следы, принадлежащие отрицательно и положительно заряженным частицам: электронам и протонам, как он думал вначале. Чтобы с уверенностью судить о направлении движения частицы, Андерсон разделил камеру на две части свинцовой пластинкой. Частица, пройдя через свинцовую пластинку, замедляется, и ее путь искривляется магнитным полем сильнее. Андерсон получил фотографию частицы, изогнутой в противоположную электронам сторону. Радиус кривизны и характер трека показали, что эта частица обладает массой электрона и положительным зарядом, равным заряду электрона. Эту частицу Андерсон назвал позитрон.

Открытие позитрона заставило вспомнить о теории Дирака. В 1928 Дирак получил релятивистское уравнение для электрона. Это уравнение приводило к выводу о существовании спина у электрона и давало точное значение для тонкой структуры энергетических уровней водорода. Однако в теории Дирака была

неприятная вещь, получившая название «плюс-минус трудность»: согласно квантовой теории электрон может перескакивать из состояния с положительной кинетической энергии в состояние с отрицательной кинетической энергией. Теория Дирака предсказывала существование позитрона и других античастиц. Предсказывала она и аннигиляцию позитрона и электрона с испусканием гамма-квантов. Существует и обратный процесс - «материализация» фотонов, когда фотоны с достаточно большой энергией при столкновении с тяжелыми ядрами могут создавать положительные электроны... фотон, взаимодействуя с ядром, может создать два электрона с противоположными зарядами. Жюлио Кюри получил фотографию в камере Вильсона, на которой было зарегистрировано рождение пары электрон - позитрон.

В 1934 Ирен и Фредерик Жолио-Кюри во Франции открыли ещё один источник позитронов –  $\beta^+$ -радиоактивность.

Следующая элементарная частица - нейтрино также вначале была предсказана теорией. Открытие нейтрона, казалось, внесло ясность в строение вещества. Все элементарные частицы, необходимые для построения атома: протон, нейтрон, электрон - были известны. Если в составе атомного ядра нет электронов, то откуда же берутся электроны, которые наблюдаются при радиоактивном распаде ядер?

Ответ на этот вопрос был дан в 1932 итальянским физиком Энрико Ферми в разработанной им теории  $\beta$ -распада.  $\beta$ -Распад в определенном смысле аналогичен испусканию фотонов возбужденными атомами. Ни электронов в ядре, ни фотонов в атоме нет до момента излучения, и фотон, и электрон образуются в процессе распада. Изучение процесса  $\beta$ -распада показало, что испускание электронов вызвано не электромагнитным взаимодействием и не ядерным взаимодействием, а новым типом взаимодействия до сих пор неизвестным в физике. Это взаимодействие было названо слабым взаимодействием.

Изучение явления  $\beta$ -распада поставило перед физиками серьёзную проблему. Экспериментальные факты казались несовместимыми с законами сохранения энергии, импульса и момента количества движения. Для того, чтобы спасти эти законы В.Паули в 1930 высказал предположение, что в процессе  $\beta$ -распада наряду с электроном, который легко наблюдается, должна рождаться еще одна лёгкая частица с нулевым зарядом, нулевой массой покоя и спином  $1/2$ . Поскольку нейтрино испускалось вместе с электроном в процессе  $\beta$ -распада, оно могло уносить недостающую энергию, импульс и момент количества движения. Для того чтобы проверить гипотезу Паули, необходимо было обнаружить нейтрино экспериментально. Однако свойства нейтрино, предсказанные Паули, делали обнаружение её чрезвычайно трудной задачей. Дело в том, что нейтрино должно было очень слабо взаимодействовать с веществом. Оно могло пролетать тысячи километров вещества без взаимодействия. Сечение взаимодействия нейтрино с энергией несколько МэВ с атомными ядрами  $\sim 10^{-34}$  см<sup>2</sup>. Экспериментальные попытки непосредственно зарегистрировать нейтрино продолжались почти двадцать лет. Лишь в 1953 году в результате очень сложного эксперимента Ф.Райнесу и К.Коуэну удалось зарегистрировать антинейтрино. Гипотеза Паули получила блестящее подтверждение.

Наличие в атомном ядре нейтронов и протонов поставило перед физиками проблему изучения природы ядерных взаимодействий, связывающих эти частицы в ядре. В 1934 Х.Юкава предсказал новую частицу - квант ядерного поля. Согласно гипотезе Юкава взаимодействие между нуклонами возникает в результате испускания и поглощения этих частиц. Они определяют ядерное поле по аналогии с электромагнитным полем, которое возникает как следствие обмена фотонами. После предсказания свойств мезона начались энергичные поиски этой частицы. В 1937 в космических лучах с помощью камеры Вильсона была обнаружена частица с массой покоя равной примерно 200 массам покоя электрона. Вначале считалось, что это и есть предсказанный Юкавой мезон. Однако более детальное исследование свойств этой частицы показало, что обнаруженные в космических лучах мезоны взаимодействуют с нейтронами и протонами не достаточно сильно, как это должно было быть для переносчиков ядерного взаимодействия. Они не захватывались атомными ядрами, а распадались с испусканием электронов. Первоначальный энтузиазм сменился некоторым разочарованием. Наконец в 1947 в космических лучах была обнаружена ещё одна частица, которая сильно взаимодействовала с протонами и нейтронами и была той самой частицей, которую предсказал Юкава. Её назвали  $\pi$ -мезоном или пионом.

Пионы, нейтроны и протоны принадлежат к одному классу частиц, называемых адронами. Их отличительная черта - участие в сильных ядерных взаимодействиях.

Открытая в 1937 частица тоже была названа мезоном,  $\mu$ -мезоном. Он имеет массу  $\sim 106$  МэВ и существует в двух разновидностях - отрицательно заряженная частица и положительно заряженная античастица. Сегодня  $\mu$ -мезон предпочитают называть мюоном. На то, что электронные и мюонные нейтрино разные частицы, было указано в 1957 М.Марковым и Ю. Швингером. Эта гипотеза была подтверждена в 1962 в экспериментах на ускорителе в Брукхейвене. Мюоны, электроны и нейтрино относятся к семейству лептонов. Ещё одна частица этого семейства - лептон (таон) была открыта М.Перлом в 1979. Она почти в два раза тяжелее протона и может распадаться не только подобно мюону на лептоны, но и на адроны. Гипотеза об осцилляции

нейтрино была выдвинута в 1957 Б.Понтекорво. В настоящее время интенсивно проводятся эксперименты по измерению массы покоя нейтрино, обнаружению осцилляций нейтрино. Если окажется, что масса нейтрино отлична от нуля, то масса вещества во Вселенной должна в основном определяться массой нейтрино.

### 3. ЭПОХА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ИДЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Долгое время идеи ядерной физики представлялись некоторой игрой ума, интересной для небольшой кучки исследователей. Ситуация коренным образом изменилась после открытия в 1939 вынужденного деления урана (О.Хан, Ф.Штрассман и Л. Мейтнер).

Новый этап развития ядерной физики начался с открытием Дж. Чадвиком нейтрона в 1932 году. Вскоре во многих научных лабораториях начали изучать процессы их взаимодействия с ядрами. В Италии Энрико Ферми обнаружил, что замедление нейтронов до тепловых скоростей приводит к резкому увеличению выхода ядерной реакции с участием нейтронов (Позднее для замедления нейтронов были отработаны способы использования графита и тяжёлой воды). Ферми, бомбардируя уран нейтронами, обнаружил возрастание в сотни раз радиоактивности мишени. Он был уверен (и не без оснований!), что при этом создаются трансурановые элементы. Эти трансурановые элементы тогда идентифицировать не удалось (нептуний и плутоний Сиборг обнаружил через 5 лет).

Ида Ноддак в 1934 году выдвинула гипотезу о том, что "при бомбардировке тяжёлых ядер исследуемое ядро распадается на несколько крупных кусков, которые, несомненно, должны быть изотопами известных элементов, подвергнутых облучению". Никто эту гипотезу всерьёз не принял. В Берлине Отто Ган и Лиза Мейтнер в течение нескольких лет тоже изучали "трансурановые" элементы Ферми, но и они не обращали внимание на замечание Ноддак.

Интенсивно занялись исследованием последствий нейтронной бомбардировки урана в Париже. Ирен Жолио-Кюри, проводившая эксперименты в соавторстве с югославом Павле Савичем, объявили, что в уране появляется вещество, подобное лантану. Проверить неожиданное сообщение взялись Отто Ган и Фриц Штрассман в Германии. Более точные анализы, проведенные ими, дали совершенно неожиданный результат: при бомбардировке урана нейтронами образуется барий, масса которого вдвое меньше массы урана. Это для них было настолько обескураживающим, что в статье, посвященной проведенным исследованиям, они написали: "Как химики, мы должны подтвердить, что это новое вещество является не радием, а барием... Как физики, знакомые со свойствами ядра, мы не можем, однако, решиться на такое утверждение, противоречащее предшествующему опыту ядерной физики".

Это событие произошло в конце 1938 года. О результатах своих экспериментов Ган сообщил тотчас же бывшей соратнице Лизе Мейтнер, которая вынуждена была эмигрировать в Швецию, опасаясь преследования за свое неарийское происхождение. Там в результате обсуждений с Отто Фришем, её племянником, работавшим в Институте Нильса Бора в Копенгагене, родилась опубликованная в феврале 1939 года в журнале "Nature" статья, в которой впервые появилось выражение "деление ядер". Поводом к этому послужило поразительное сходство картины перестройки ядра с процессом деления, которым размножаются бактерии.

Сообщение Гана и Штрассмана было встречено вначале недоверчиво, а сами результаты вызывали недоумение. Действительно, до этого экспериментаторы бомбардировали ядра частицами из ускорителей и обнаружили, что для вырывания из ядра одного или двух нуклонов требуется энергия в миллионы электронвольт. Казалось бы, для того чтобы вызвать деление тяжелого ядра, потребуются сотни миллионов электронвольт, а из результатов Гана и Штрассмана следовало, что для деления ядра урана достаточно сообщить ему энергию в 6 МэВ, которую легко получить добавлением одного нейтрона. Это все равно, что твердый камень раскалывался бы от постукивания карандашом. Через два года после открытия Гана и Штрассмана, в 1940 Г.Н. Флеров и К.А. Петржак обнаружили, что ядра урана могут делиться самопроизвольно (спонтанно). Период полураспада спонтанного деления  $^{238}\text{U}$  оказался равным  $8 \cdot 10^{15}$  лет.

Узнав об открытии деления ядер, Нильс Бор, находившийся в то время в США, вместе с Джоном Уиллером из Принстонского университета задумались над объяснением этого явления, и через несколько месяцев они опубликовали работу, в которой предложили детальную модель, удовлетворительно объясняющую первоначальные наблюдения. Независимо аналогичные соображения были высказаны тогда же Я.И. Френкелем. Так возникла ныне широко известная аналогия между делением ядра и делением капли жидкости при деформации - капельная модель ядра.

С этого момента начинается бурное развитие ядерной физики – открытия пошли одно за другим.

И.Нишина открыл деление тория-232 быстрыми нейтронами. А Уэллс и Хэксби – деление урана под действием  $\gamma$ -излучения с энергией 6 МэВ, получающихся при расщеплении фтора протонами. Р. Роберте, Р. Мейер, П. Ванг открыли запаздывающие нейтроны, а Л. Сцилард, Э. Ферми, Г. Андерсон, В. Зинн, Ф. Жолио-

Кюри, Х. Халбан, Л. Коварски – испускание вторичных нейтронов при делении, Френсис Перрен ввёл понятие критической массы урана, при достижении которой начинается неуправляемый цепной процесс деления. К важнейшим достижениям всё того же 1939-го года следует отнести Сцилард, Ю. Вигнер, Э. Ферми, Дж. Уилер, Ф. Жолио-Кюри, Я.Б. Зельдович, Ю.Б. демонстрацию возможности протекания в уране цепной ядерной реакции деления (Л. Харитон). В следующем году Ю. Бут, Дж. Даннинг и А. Гросс открывают деление урана-235 медленными нейтронами. К этому моменту уже открыто явление деления под действием нейтронов следующих ядер:  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{236}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{238}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{239}\text{U}$ ,  ${}_{90}^{233}\text{Th}$ ,  ${}_{90}^{231}\text{Th}$ ,  ${}_{91}^{232}\text{Pa}$ . Наконец, в 1941 Дж. Кеннеди и Г.Сиборг демонстрируют, что один изотоп синтезированного недавно нового элемента - плутоний-239 - хорошо делится медленными нейтронами. В 1941 вводится единица ядерного сечения – барн.

Открытие цепного деления урана превратило ядерную физику в идеологическую основу мощной промышленности – самой мощной, которую знало человечество. Началось активное строительство атомных реакторов, сначала исследовательских, потом промышленных (наработка оружейного плутония), а затем и энергетических. В короткие сроки было создано атомное, водородное и нейтронное оружие. А публикации по ядерной физике надолго прекратились...

В эту эпоху помимо прикладных исследований, ядерная физика развивала и свои фундаментальные основы, в частности создавались теории ядерных реакций.

Резерфорд впервые наблюдал ядерную реакцию 1919, а первая модель ядерной реакции появилась лишь в 1935. Это была модель Оппенгеймера - Филлипса, предложенная для интерпретации реакции ( $d,p$ ) при низких энергиях. Дальнейший прогресс представлений о механизмах ядерных реакций долгое время был связан с концепцией составного ядра (компаунд-ядра), которая была предложена в 1936 Н.Бором для объяснения резонансной структуры сечений захвата нейтронов и протонов низких энергий атомными ядрами. Первое количественное описание реакции, идущей через компаунд-ядро, было получено Брейтом и Е.Вигнером в 1936. Широкое распространение в расчетах сечений ядерных реакций получила феноменологическая модель испарения, предложенная В. Вайскопфом в 1937. В 30-50-х годах на основе "первых принципов" развивалась формальная теория ядерных реакций. Различные варианты формальной теории не содержали конкретных физических предположений таких, например, как гипотеза независимости, и в принципе могли описывать различные механизмы ядерных реакций. Однако применение их для практических расчётов было связано с большими трудностями. Тем не менее, развитые в этих работах подходы позволили глубже понять физику процессов, происходящих в ядре и были использованы при создании моделей.

К началу 50-х годов создание последовательной теории реакций, идущих через составное ядро, было в основном завершено. С помощью теории компаунд-ядра удалось удовлетворительно описать большое количество экспериментальных данных. При вычислении сечений предполагали, что любая частица, попав в ядро, должна поглотиться (модель «черного» ядра), т.е. одночастичное движение должно полностью затухнуть. Однако начали появляться экспериментальные данные, которые свидетельствовали, что одночастичное движение не затухает полностью. Для описания усредненного поведения сечений Г.Фешбах, К.Портер и В.Вайскопф в 1954 предложили оптическую модель, которая получила свое название из-за аналогии рассеяния частиц на ядре с прохождением света через полупрозрачную сферу. Успехи оптической модели в описании упругого рассеяния привели к пониманию механизма протекания прямых ядерных реакций, в принципе отличающегося от механизма протекания ядерных реакций через составное ядро.

Важное достижение ядерной физики второй половины 20-го века – открытие в 1961 явления спонтанного деления ядер, находящихся в изомерном состоянии (С.М.Пеликанов, В.А.Друин, В.А.Карнаухов).

После появления в 1966 пионерской работы Дж.Гриффина наметился рост экспериментальных и теоретических работ, посвященных предравновесным процессам. Сегодня предравновесные процессы делят на два класса: многоступенчатые прямые процессы, в которых происходит эволюция открытых состояний, и многоступенчатые компаунд-процессы, связанные с эволюцией закрытых состояний и связи их с открытыми состояниями. Под открытыми состояниями понимаются состояния, в которых хотя бы один нуклон находится выше энергии связи и может вылететь. В закрытых состояниях все нуклоны находятся ниже энергии связи.

В реакциях с тяжелыми ионами в 70-е годы в Дубне группой В.Волкова был открыт новый тип ядерных реакций - реакции глубоконеупругих передач. Специфика глубоконеупругих передач обусловлена качественными изменениями процесса взаимодействия двух сложных ядер по сравнению с реакциями с лёгкими ионами. В основе этого взаимодействия лежат процессы формирования, эволюции и распада специфического ядерного комплекса - двойной ядерной системы. За счёт кинетической энергии сталкивающиеся ядра проникают друг в друга, возрастает зона перекрытия их поверхностей. Из-за большой

вязкости ядерной материи и соответственно из-за большого ядерного трения подавляющая часть кинетической энергии переходит в возбуждение системы, скорость относительного движения падает до нуля. Часть кинетической энергии переходит в энергию вращения ядер. Однако, несмотря на интенсивное взаимодействие, оболочечная структура обеспечивает ядрам сохранение их индивидуальности. В зоне обмена нуклоны переходят из одного ядра в другое, однако нуклоны внутренних оболочек образуют довольно устойчивые коры, сохраняющие индивидуальность ядер. Эволюция системы происходит в направлении минимума потенциальной энергии системы, в процессе которой нуклоны от одного ядра оболочка за оболочкой передаются другому. Если кулоновские и центробежные силы превосходят силы притяжения, система будет распадаться. Однако, если результирующая сила невелика, распад будет происходить медленно и от ядра к ядру может быть передано значительное количество нуклонов.

Исследуя атомное ядро, ядерная физика использует различные теоретические модели, которые могут показаться противоречащими друг другу. Немецкий физик М. Борн предложил в 1936 гидродинамическую модель атомного ядра, согласно которой ядро уподобляется капле заряженной плотной жидкости, состоящей из интенсивно взаимодействующих между собой нуклонов (нейтронов и протонов). Как и в капле обычной жидкости, поверхность капли -ядра может колебаться, что при некоторых условиях приводит к развалу ядра. Американский физик М. Гепперт-Майер и одновременно немецкий физик И. Йенсен разработали в 1950 оболочечную модель атомного ядра, в которой нуклоны ядра движутся независимо друг от друга в некоем усредненном поле ядерной силы. Подобно электронам в атоме, нуклоны заполняют различные оболочки, каждая из которых характеризуется определённым значением энергии. Стремясь примирить взаимно исключаящие исходные положения гидродинамической и оболочечной моделей, датские физики О.Бор и Б.Моттельсон, а также американский физик Дж.Рейнуотер разработали в начале 1950-х гг. обобщенную модель атомного ядра. Согласно этой модели, ядро состоит из сердцевины – устойчивой внутренней части (нуклоны целиком заполненных оболочек) и «внешних» нуклонов, движущихся в поле, создаваемом нуклонами сердцевины. Под влиянием внешних нуклонов сердцевина ядра может деформироваться, принимая форму вытянутого или, напротив, сплюснутого эллипсоида; может испытывать колебания.

В то время когда в физике частиц происходило продвижение в сторону высоких энергий и открывались новые частицы, в состав которых входили все более массивные кварки, качественно изменилась ситуация и в "традиционной" ядерной физике. Улучшение техники ионных пучков и методов сепарации короткоживущих изотопов существенно расширило число исследованных ядер. К концу XX века было открыто ~ 3000 атомных ядер. Всего в границах ядерной стабильности по существующим оценкам их может быть около 7000.

Наряду с хорошо известными модами распада атомных ядер –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и спонтанным делением были обнаружены новые типы радиоактивности. В 1962 в ОИЯИ (Дубна) впервые была зарегистрирована протонная радиоактивность. Она наблюдалась для нейтронодефицитных ядер вблизи границы протонной стабильности. Было обнаружено, что ядра могут самопроизвольно испускать ядра тяжелее  ${}^4\text{He}$  – кластерная радиоактивность. Впервые кластерная радиоактивность наблюдалась в распаде  ${}^{223}\text{Ra} \rightarrow {}^{209}\text{Pb} + {}^{14}\text{C}$ .

## 4. СОВРЕМЕННАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

В современной ядерной физике можно выделить следующие направления:

- Поиск новых сверхтяжелых ядер.
- Исследование свойств ядерной материи в экстремальных условиях - в области низкой температуры и низкой плотности ядерной материи и в области высокой температуры и высокой плотности ядерной материи. Состояния с высокой плотностью ядерной материи интенсивно исследуются в столкновениях релятивистских ядер. Ведутся исследования в области мультифрагментации и полного развала ядра на нейтроны и протоны.
- Исследование формы и свойств атомных ядер в супердеформированных состояниях и в состояниях с экстремально большими спинами.
- Исследование атомных ядер вдали от долины стабильности, вблизи от границ нейтронной и протонной стабильности.
- Изучение новых типов радиоактивного распада. Поиск новых долгоживущих изомерных состояний
- Открытым и требующим дальнейших исследований является вопрос о роли кварковых степеней свободы и их влияние на короткодействующую составляющую ядерных взаимодействий.
- Кварк-глюонная структура нуклона и изменение его свойств в ядерной материи.

В настоящее время методы сепарации и детектирования достигли такого совершенства, что основные характеристики атомных ядер: масса, период полураспада, основные моды распада - могут быть получены на основе анализа небольшого их числа.

Метод сепарации тяжелых ионов на лету позволяет получать моноизотопные пучки ускоренных ядер вплоть до урана. Появились новые экспериментальные методы для изучения свойств атомных ядер - комбинации ускорителей с ионными ловушками для низкоэнергетических ионов и накопительные кольца для ионов низких и средних энергий. Существенный прогресс в исследовании ядер с необычным отношением  $N/Z$  - экзотических ядер - связан с возможностью накопления высокоэнергетических вторичных пучков радиоактивных ядер и изучения реакций на этих пучках.

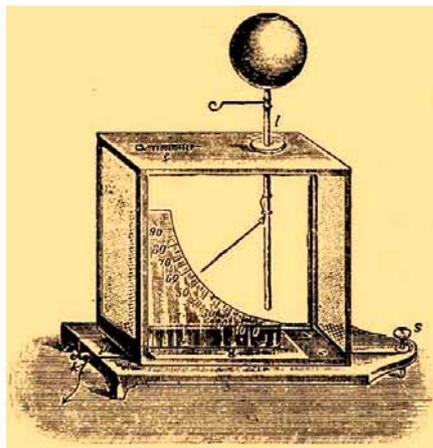
## 5. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЙ

В истории ядерной физики существенную роль сыграло развитие экспериментальной техники, включая методы регистрации радиоактивных излучений (детекторы, счётчики и спектрометры радиоактивных излучений), точные методы регистрации зарядов и масс элементарных частиц, атомов и ионов (например, масс-спектрометры).

Как уже упоминалась, А.Беккерель при определении радиоактивности солей урана использовал фотографический способ регистрации излучений. Впоследствии на базе использования фотоэмульсий была создана техника автордиографии. Сначала использовалась тонкослойная автордиография для контроля за распределением радиоактивного вещества по поверхности образца. В 1925 разработан метод толстослойных ядерных фотоэмульсий (трековая автордиография, Л.В.Мысовский), который сначала был применён для определения энергии альфа-частиц, а потом - для исследования космических лучей (М.Блау, 1936). Этим же методом получена фотография следа протона и расщепления ядра азота альфа-частицами, т.е. осуществлено первое наблюдение ядер отдачи (П. Блэккетт, 1925). В 1946 Созданы ядерные фотоэмульсии высокой чувствительности (С.Пауэлл). В 1948 изобретена нейтронная радиография (Х.Кальман). Первый радиометр – прибор для измерения плотности ионизирующих излучений сконструировал У.Крукс. Он же в 1904 открыл эффект сцинтилляций и сконструировал сцинтиллятор.

Успех М.Кюри в обнаружении радиоактивности соединений урана и тория связан с оригинальным методом регистрации излучений, основанном на эффекте не задолго до этого открытом П.Кюри и его братом. Зная, что Беккерель обнаружил, что испускаемое ураном излучение повышает электропроводность воздуха вблизи радиоактивных препаратов, М.Кюри использовала для измерения электропроводности воздуха (и, следовательно, радиоактивности препарата) балансир братьев Кюри, работающий на пьезоэлектрическом кварце. Братья Кюри открыли пьезоэлектричество – появление под действием приложенной извне силы на поверхности некоторых кристаллов электрических зарядов. Ими был открыт и обратный эффект: те же кристаллы под действием электрического поля испытывают сжатие. На основе этих открытий они и создали пьезоэлектрический прибор – эффективный детектор ионизирующего излучения.

В основном же учёные того времени следили за радиоактивностью с помощью электроскопов и электрометров - приборов для обнаружения и измерения электрического заряда, основанных на эффекте ионизации воздуха ионизирующим излучением. Со временем, развитие этой техники привело к созданию ионизационных камер (сначала – токовой, потом – импульсной). Ионизационная камера – прибор для регистрации и спектрометрии частиц, представляет собой электрический конденсатор, заполненный газом. Её действие основано на измерении электрического заряда, возникающего при ионизации газа отдельной частицей либо потоком частиц за определённый промежуток времени.



Резерфорд изучал взаимодействие альфа-частиц с веществом с помощью сцинтиллирующего экрана на базе сульфида цинка. В сцинтилляторах (люминофорах) под действием ионизирующего излучения возникают световые вспышки – сцинтилляции. На базе этого явления был разработан сцинтилляционный детектор, предназначенный для регистрации и спектрометрии частиц.

Существенную роль сыграло изобретение прибора для регистрации отдельных заряженных частиц (счетчик Г.Гейгера – В. Мюллера). В 1908 Г.Гейгер и Э.Резерфорд сконструировали прибор для регистрации отдельных заряженных частиц. В 1928 Гейгер усовершенствовал его с В.Мюллером. Счётчик представляет собой газонаполненный диод (обычно цилиндрический) с тонкой нитью в качестве анода. Действие основано на возникновении в газе в результате его ионизации (при пролёте частицы) электрического разряда (коронного). Электрический сигнал с детектора усилен за счёт вторичной ионизации газового объёма счётчика и не

зависит от энергии, оставленной частицей в этом объёме. Со временем счётчик Гейгера-Мюллера был модифицирован в пропорциональный счётчик спектроскопического типа, который оказался особенно эффективным при регистрации мягкого гамма и рентгеновского излучения.

Дальнейшее развитие систем детектирования ионизирующего излучения привело к разработке метода совпадений (В.Боте, 1924). Метод совпадений является одним из вариантов метода сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, определяют по совпадению отметок на шкалах или сигналах. В 1929 этот метод был применён для исследования космических лучей (опыты В.Боте – В.Кольхерстера). Было обнаружено, что первичное космическое излучение состоит из заряженных частиц очень высокой проникающей способности. В 1925, исследуя вместе с Г.Гейгером эффект Комптона (рассеяние жёстких гамма-лучей на электронах), Боте впервые экспериментально доказал справедливость сохранения энергии и импульса для каждого элементарного акта рассеяния. В 1939 в технику измерений внедрён сцинтилляционный счётчик (Х. Кальман). В 1945 изобретен кристаллический (полупроводниковый) счетчик (Г.Ван Хеерден) на котором базируется современная электронная счётная аппаратура. В 1946 создан нейтронный спектрометр. В том же году Б.М.Понтекорво) предложил метод детектирования нейтрино путём использования реакции  $^{37}\text{C} + \nu \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ . В 1947 излучение Вавилова – Черенкова впервые использовано для регистрации быстрых частиц. В радиометрию вошли черенковские счетчики (И.Геттинг).

Помимо ионизационных спектрометров были созданы и специфические спектрометры, предназначенные для измерения энергетического спектра излучения. Так, в 1912 создан рентгеновский спектрометр (Г.Брэгг), а также магнитный спектрометр с фокусировкой и фотографической регистрацией (Дж. Даныш, Э.Резерфорд, Г.Робинсон), что позволило непрерывного спектра энергии бета-излучения (Дж. Чэдвак, 1914). В 1935 создан первый селектор скоростей для медленных нейтронов (Дж. Даннинг, Дж. Пеграм, Д.Митчелл, Э.Сегре, Дж. Финк). В 1945 создан нейтронный спектрометр.

В анализе излучений особо эффективными оказались магнитные спектрометры. По отклонению в магнитном поле в 1900 радиоактивное излучение было разделено на три компонента: альфа-, бета- и гамма-лучи. С их помощью в 1910 было проведено первое определение энергии бета-частиц по их отклонению в магнитном поле (О.Байер, О.Хан). В 1912 создан спектрометр с магнитной фокусировкой (Дж. Даныш).

В измерении массы атомов и заряженных частиц существенную роль сыграли масс-спектрометры. Принцип действия масс-спектрографа предложен Дж.Дж. Томсоном (1907). Он же предложил «метод парабол» для определения относительных масс частиц ионных пучков (1911). На базе точных измерений масс П.Ланжевэн ввёл понятие дефекта массы (1913), сыгравшего существенную роль при энергетических расчётах ядерных реакций. Первый масс-спектрометр построен А.Демпстером (1918). В 1919 Ф.Астон сконструировал масс-спектрограф с достаточно высокой разрешающей способностью. В 1927 он получил экспериментальное доказательство, что масса ядра не равна сумме масс входящих в ядро частиц, а меньше этой величины на несколько десятых процента.

В 1912 изобретен прибор для наблюдения следов заряженных частиц (камера Ч. Вильсона). Это был первый трековый детектор заряженных частиц. Действие основано на конденсации пересыщенного пара (образовании мелких капелек жидкости) на ионах, возникающих вдоль следа (трека) заряженной частицы. В 1923 камера Вильсона была помещена в сильное магнитное поле, что позволило наблюдать искривления треков альфа-частиц (П.Л.Капица, Д.В.Скобельцын). В 1933 создана камера Вильсона, управляемая счетчиками (П.Блэкетт, Дж. Оккиалини). В 1939 изобретена диффузионная камера (Лангсдорф).

Рост энергий частиц, задействованных в ядерной физике и физике элементарных частиц, привёл к созданию новых типов детекторов. В 1948 был изобретен искровой счетчик (Дж. Кейфель), а в 1957 искровая камера (Т.Краншау, Дж. де Вир). В 1952 Д. Глезер изобрел пузырьковую камеру.

Развитие техники эксперимента по исследованию ионизирующих излучений привело к открытию новых эффектов, существенно продвинувших исследование структуры вещества. В качестве примера можно упомянуть 1958 открытие явления ядерного гамма-резонанса без отдачи (эффект Р.Мессбауэра, 1958). К другим примерам относится электронный микроскоп, туннельный микроскоп, метод нейтронографии и др. Идею электронного микроскопа предложил Г.Буш в 1922. Годом изобретения электронного микроскопа считается 1929. В 1936 изобретен автоэлектронного микроскопа (Э.Мюллер), а в 1937 электронный растровый микроскоп (М.Арденне). В 1970 состоялось долгожданное наблюдение отдельных атомов при помощи сканирующего электронного микроскопа.

Нобелевские премии по физике за создание методов и приборов регистрации частиц. 1907 г. — А. Майкельсон: За прецизионные оптические приборы и за спектроскопические и метрологические исследования, выполненные с их помощью.

1927 г. — Ч. Вильсон: За открытие метода, делающего видимыми траектории заряженных частиц, с помощью конденсации пара.

1948 г. — П. Блэккетт: За создание метода камеры Вильсона и открытия, сделанные с его помощью в области ядерной физики и космических лучей.

1950 г. — С. Пауэлл: За создание фотографического метода и открытия, связанные с мезонами, сделанные с помощью этого метода.

1954 г. — В. Боте: За метод совпадений и сделанные с его помощью открытия.

1960 г. — Д. Глезер: За изобретение пузырьковой камеры.

1992 г. — Г. Чарпак: За открытие и создание детекторов частиц, в частности, многопроволочной пропорциональной камеры.

## 6. РАЗВИТИЕ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Важное направление развития техники эксперимента связано с созданием ускорителей заряженных частиц и ионов. До создания ускорителей, в руках физиков находился лишь один инструмент осуществления ядерной реакции – альфа-частицы, образующиеся при распаде радионуклидов. Они использовались или непосредственно, например, для превращения азота в кислород, либо косвенно – для генерации нейтронов (радио-бериллиевые или полоний-бериллиевые источники нейтронов), с последующим их использованием для осуществления ядерных реакций. Создание ускорителей электронов, протонов, дейтронов, ионов отдельных элементов и т.п. существенно расширило возможности экспериментаторов, поскольку позволило

варьировать в широких пределах массу и заряд бомбардирующей мишень частицы, поток частиц и их энергию. Ускорители являются также источниками пучков вторичных частиц (мезонов, нейтронов, фотонов), получаемых при взаимодействии первичных частиц с веществом.

Первым ускорителем электронов была трубка Крукса. Но реальностью ускорители стали только в конце 20-х годов. Создание первых ускорителей Дж.Кокрофтом и Э.Уолтоном, Р.Ван-де-Графом, Э.Лоуренсом в 1931-32 гг. открыло новую эру в ядерной физике. Экспериментаторы получили в свое распоряжение удобные инструменты, на которых можно было получать пучки ускоренных заряженных частиц с энергией от нескольких МэВ до десятков МэВ.

**1924** - Получение кратковременных магнитных полей напряженностью до 500 тысяч эрстед (П.Л.Капица).

**1925** - Идея линейного резонансного ускорителя (Г.А.Изинг).

**1928** – Начало работ по созданию ускорителя протонов (Дж. Кокрофт и Э.Уолтон)

**1929** - Осуществление ускорения ионов в короткой системе связанных высокочастотных резонаторов.

**1930** - Пуск циклотрона (Э.Лоуренс, М.Ливингстон). С помощью сильного магнитного поля пучок заставили двигаться по круговой орбите и много раз проходить один и тот же ускоряющий промежуток.

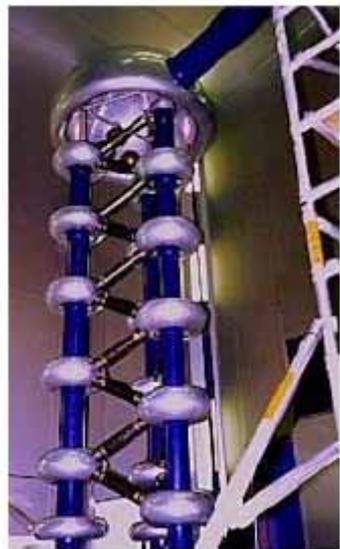
**1931** - Создание электростатического ускорителя заряженных частиц (генератор Р.Ван де Граафа). Первую действующую модель своего генератора Ван де Грааф построил в 1929.

**1931** – Пуск линейного ускорителя ионов, в котором ионы, проходя через ряд цилиндров увеличивающейся длины, ускорялись высокочастотным напряжением, подобранным так, что в зазоре между цилиндрами ионы попадали в ускоряющую фазу (Слоан, Лоуренс)

**1932** – Создание прибора для импульсного ускорения протонов и альфа-частиц. Каскадный генератор - высоковольтный генератор, работающий по принципу умножения напряжения (Дж. Кокрофт и Э.Уолтон). Заряжая группу конденсаторов, соединенных параллельно, а затем подключая их последовательно к последовательности ускорительных трубок, Дж.Кокрофт и Э.Уолтон получали напряжения до 1 МВ.

**1932** - Осуществление первой ядерной реакции с искусственно ускоренными протонами – трансмутация ядер лития в гелий и другие элементы. Высокий выход альфа-частиц был достигнут бомбардировкой атомов лития протонами, когда на трубку генератора было подано 600 киловольт. Ядро лития-7 удалось расщепить на два ядра гелия (энергия гелия около 8,5 МэВ) и два кванта, разлетавшиеся в противоположных направлениях, причем суммарная энергия квантов была в точности равна дефекту массы ядер. Первое в мире успешное превращение химических элементов без участия естественной радиации (Дж. Кокрофт и Э.Уолтон).

**1932** – Демонстрация возможности получения радиоактивных ядер путём бомбардировки атомов углерода и бора ускоренными протонами и дейтронами (Дж. Кокрофт и Э.Уолтон). Бомбардировка ускоренными



частицами (протонами и дейтронами) мишеней из лития и дейтерия вскоре привели к открытию трития и гелия-3 (*d-d*- реакция, М. Олифант).

**1932** - Пуск установки для искусственного ускорения протонов – каскадного генератора (ускоритель Дж. Кокрофта – Э.Уолтона).

**1932** - Пуск циклотрона с диаметром полюсных наконечников 28 см, ускоряющий протоны до 1,2 МэВ (Лоуренц. Принцип циклотрона предложен Лоуренсом и Эдлефсенем в 1930).

**1939** – Пуск самого мощного в мире 60-дюймового циклотрона, дававшего пучок дейтронов с энергией 16 МэВ (Беркли, Лоуренс)

**1940** – Пуск первого бетатрона для ускорения электронов (Д. Керст). Бетатрон - индукционный ускоритель, в



котором электроны удерживаются на равновесной круговой орбите растущим синхронно с увеличением энергии магнитным полем. Ускорение происходит за счёт вихревого электрического поля создаваемого переменным магнитным потоком внутри равновесной орбиты. В бетатронах энергия ускоренных электронов может достигать сотни МэВ.

**1943**- Идея кольцевого магнита в ускорителях (М.Олифант)

**1944** - Идея микротрона (В.И.Векслер).

**1944** - Принцип ускорения частиц – принцип автофазировки, который лег в основу создания новых ускорителей заряженных частиц – фазотрона, синхротрона, синхрофазотрона, микротрона; дал его математическую теорию. (В.И.Векслер, в 1945 этот же принцип предложил Э.Макмиллан, идею автофазировки в 1934 выдвинул Л.Сцилард).

**1946** - Пуск линейного ускорителя электронов с бегущей волной (Дж. Фрай).

**1946** - Пуск синхроциклотрона - ускорителя, основанного на принципе автофазировки (Говард, Барнес). с пучком дейтронов 195 МэВ. Поздние модификации обеспечили протоны с 350 МэВ и другие ионы

с 750 МэВ. Впервые зарегистрировано рождение пионов. Р.Вильсон предложил использование в лучевой терапии тяжелых заряженных частиц, в частности протонов.

**1947** – Пуск линейного ускорителя на 32 млн электрон-вольт (Беркли, Л. Альварец). Первая фиксация синхротронного излучения.

**1948** – Пуск первого в СССР и третьего в мире ускорителя электронов (синхротрона), основанного на принципе автофазировки, открытом В.И. Векслером в 1944 году. Синхротрон на 30 МэВ многие годы служил источником гамма-лучей при изучении фотоядерных реакций.

**1949** - ввод в действие в небольшом подмосковном поселке Ново-Иваньково (ныне г.Дубна, объединённый институт ядерных исследований, первый директор Д.И.Блохинцев), первого в СССР самого крупного в мире ускорителя частиц - 5-метрового синхроциклотрона. Получение на нем сначала дейтронов, альфа-частиц и протонов с энергиями соответственно 280, 560 и 480 МэВ, а вскоре (в 1953 г., после увеличения диаметра полюсов магнита до 6 м) протонов с энергией 680 МэВ знаменовали собой рождение в СССР новой области ядерной физики - физики частиц высоких энергий.

**1949** - Идея сильной фокусировки (И.Кристофилос; Э.Курант, М.Ливингстон, Г.Снайдер).

**1949** - Идея встречных пучков (Р.Видероз, дальнейшее развитие - Д.Керст, Г.И.Будкер).

**1954** - Пуск протонного синхрофазотрона (Бэватрона) на 6,2 ГэВ В (Беркли, США). В последствие переделан на ускорение тяжёлых ионов – был способен ускорять ионы любого элемента до энергии 1 ГэВ на нуклон.

В 1944-45 годах В.Векслер и независимо от него Э.Макмиллан открыли принцип автофазировки, позволяющий достигать релятивистских энергий ускоренных частиц. Открытие принципа автофазировки привело к появлению новых типов ускорителей - фазотронов, синхротронов, синхрофазотронов. Разработка метода сильной фокусировки позволила получать уникальные по своим параметрам пучки (с малыми поперечными размерами, высокой интенсивностью, большими энергиями).

**1956** - Новый способ ускорения частиц движущейся плазмой; идея коллективного метода ускорения (В.И. Векслер).

**1958** - Первый тандемный ускоритель отрицательных ионов (Р.Ван де Грааф).

**1958** - Пуск протонного синхрофазотрона с жесткой фокусировкой на 28 млрд. эв (ЦЕРН).

**1960** - В СССР создан ускоритель многозарядных ионов.



**1962** - Создан линейный ускоритель мощных пучков релятивистских электронов – линейный индукционный ускоритель (У.Лэмб). Принцип его действия предложил в 1939 А.Буверс.

**1963** - Пуск первых советских ускорителей со встречными электрон-позитронными пучками (Харьков, Новосибирск).

**1966** - Вступил в строй самый мощный линейный ускоритель электронов на энергию 21 млрд. эВ (Станфорд).

**1967** - Пуск импульсного протонного синхрофазотрона У-70 с жесткой фокусировкой на 76 ГэВ (Протвино). На этом ускорителе было сделано

открытие ядер антивещества – антигелия и антитрития, открытие закона т.н. «масштабной инвариантности в инклюзивных процессах».

**1970** - В.П.Саранцев реализовал метод ускорения частиц с помощью электронных колец, предложенный В.И.Векслером.

**1971** - Введено в строй накопительное кольцо с протон-протонными сталкивающимися пучками с энергией протонов 25 ГэВ (ЦЕРН).

**1971** - Вступил в строй протонный синхротрон в Батавии на 400 млрд. эВ (Р.Р.Вильсон).

Первые ускорители высоких энергий были построены в Дубне (ОИЯИ), вблизи Женевы (CERN) и Брукхейвене (BNL). В первых ускорителях пучок частиц направлялся на неподвижную мишень. Однако по мере увеличения энергии налетающих частиц все большая часть энергии пучка бесполезно расходуется на движение центра масс образующейся системы. Если же сталкиваются между собой два пучка можно получить значительный выигрыш в энергии, так как при лобовом столкновении двух пучков частиц с одинаковыми массами и одинаковыми энергиями центр масс будет оставаться неподвижным. Однако, чтобы при этом сталкивающиеся пучки эффективно взаимодействовали, необходимо создать в области столкновения высокую плотность частиц. Ускорители такого типа были созданы и получили название ускорителей на встречных пучках или коллайдеров. Первые электронные коллайдеры были построены в 1965 в ИЯФ (Новосибирск) и Стенфордской национальной лаборатории. В 1971 был построен первый протонный коллайдер, а в 1985 - протон-антипротонный коллайдер.

Современные ускорители это комплексы, состоящие из нескольких ускорителей. На рис. 1 показан ускорительный комплекс CERN, в котором планируется сталкивать протоны с суммарной энергией 14 ТэВ в системе центра масс. Он носит название LHC (Large Hadron Collider). Основная задача установки ATLAS - поиск Хиггсовских бозонов. Электронная система установки способна выделять 100 "интересных" событий в секунду из 1 миллиарда. В проекте ATLAS более полутора тысяч участников из 47 стран.

Нобелевские премии по физике за создание методов и приборов регистрации частиц:

1907 г. - А. Майкельсон: За прецизионные оптические приборы и за спектроскопические и метрологические исследования, выполненные с их помощью.

1927 г. - Ч. Вильсон: За открытие метода, делающего видимыми траектории заряженных частиц, с помощью конденсации пара.

1948 г. - П. Блэккетт: За создание метода камеры Вильсона и открытия, сделанные с его помощью в области ядерной физики и космических лучей.

1950 г. - С. Пауэлл: За создание фотографического метода и открытия, связанные с мезонами, сделанные с помощью этого метода.

1954 г. - В. Боте: За метод совпадений и сделанные с его помощью открытия.

1960 г. - Д. Глезер: За изобретение пузырьковой камеры.

1992 г. - Г. Чарпак: За открытие и создание детекторов частиц, в частности, многопроволочной пропорциональной камеры.

## 7. РАЗВИТИЕ РЕАКТОРОСТРОЕНИЯ

Открытия первой трети 20-го века в области ядерной физики, радиохимии и материаловедения поставили на повестку дня создания атомного реактора, обеспечивающего проведение контролируемой цепной реакции деления урана.

Для реакторостроения важное значение имело открытие и выделение таких изотопов, как изотопы водорода: дейтерий,  $^2\text{H}$  (выделение дейтерия, 1932, Г.Юри) и тритий,  $^3\text{H}$  (Э. Резерфорд, М.Олифант, П. Хартек, 1934)), изотопы урана:  $^{238}\text{U}$  (1930, Ф.Астон) и  $^{235}\text{U}$  (1935, А.Демпстер, А.Нир) и  $^{233}\text{U}$  (1941, Г.Сиборг), изотопы плутония (в первую очередь плутония-239), изотопы лития, бора и др. Разработка методов разделения изотопов и их очистки. Получение тяжелой воды (электролиз, 1933, Г.Льюис, Р.Магдональд). Важное значение имело и развитие радиационной физики, в частности радиационного материаловедения.

Основными событиями, предшествующими началу бурного развития реактора были: открытие нейтрона (Чедвиг) и ядерных реакций с участием нейтронов (в первую очередь тепловых нейтронов); разработка методов замедления нейтронов без их существенных потерь), открытие вынужденного (порогового) деления урана  $^{238}\text{U}$  под действием нейтронов (1938, О.Хан, Ф.Штрассман), экспериментальное доказательство деления ядра урана на два осколка и непосредственное измерение энергии деления (1939, О.Фриш, Ф. Жолио-Кюри, Г. Андерсон, Дж. Даннинг), выделение  $^{235}\text{U}$  и открытие его беспорогового деления (т.е. деления тепловыми нейтронами) (1940, Ю.Бут, Дж. Даннинг, А.Гросс), испускание вторичных нейтронов при делении, причём в количествах, больших, чем затрачено на деление (1939, Л.Сцилард, Э.Ферми, Г.Андерсон, В.Зинн, Ф.Жолио-Кюри, Х. Халбан, Л.Коварски), испускание запаздывающих нейтронов (1939, Р.Робертс), обоснование возможности протекания в уране цепной ядерной реакции деления (Л.Сцилард, Ю.Вигнер, Э.Ферми, Дж. Уилер, Ф.Жолио-Кюри, Я.Б.Зельдович, Ю.Б.Харитон) и возможности при определённых условиях управления цепной реакции, протекающей в уране под действием медленных нейтронов, расчёт критической массы, идея использования графита как замедлителя нейтронов (1939, Дж. Пеграм, Л.Сцилард, Э.Ферми, Г.Плачек), идея использования тяжелой воды как замедлителя нейтронов (1940, Х. Халбан, Л.Коварски).

Эти открытия позволили построить (под трибунами университетского стадиона в г.Чикаго) первую экспериментальную систему (реактор CP-1 - *Chicago Pile* – *Чикагский котёл*) с уран-графитовой решеткой (1941, Э.Ферми) и осуществить управляемую цепную реакцию деления ядер урана (1942, Э.Ферми, Л.Сцилард, Г.Андерсон, В.Зинн). Реактор работал на тепловых нейтронах, топливом служил металлический необогащённый уран, замедлителем – графит, специально очищенный от нежелательных примесей.

В СССР уран графитовый реактор был построен в 1946 под руководством И.В. Курчатова.

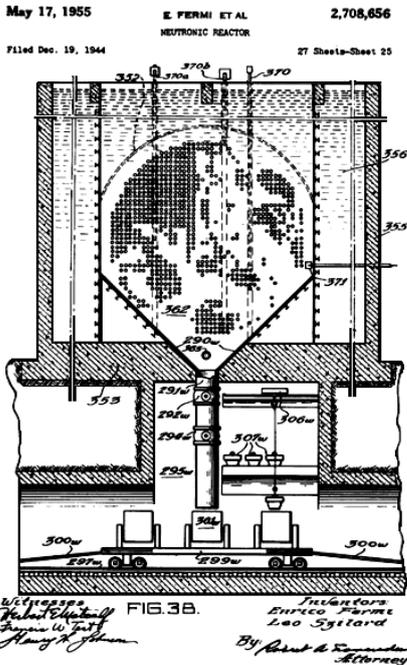
Реактор Ф-1 (физически первый) имел сферическую форму и был составлен из крупных графитовых призм с блочными уран-графитовыми вставками. На его строительство потребовалось 50 т сверхчистого природного металлического урана и 500 т сверхчистого графита. Активная зона реактора была окружена слоем нейтронной изоляции из графита. Сначала из графитовых блоков собирали модели таких сфер в порядке увеличения их диаметра. Таких моделей было сложено и разобрано четыре, пятая стала реактором. Сам реактор располагался в бетонированном котловане, на дно которого были уложены восемь слоев графитовых брусков. Над ними укладывались слои с отверстиями-гнездами, в которые были вставлены блоки из урана. Были также сделаны три канала для кадмиевых стержней регулирования реакции и аварийной остановки и ряд горизонтальных каналов различной формы и размеров для измерительной аппаратуры и экспериментальных целей. Общее число слоев из графитовых брусков составило шестьдесят два. 25 декабря 1946 г. И.В.Курчатов лично запустил реактор, подняв кадмиевый стержень регулировки цепной реакции.

Так впервые на Евразийском континенте был осуществлен управляемый процесс цепного ядерного деления. Реактор работает до сих пор. Этот реактор Ф-1 послужил прообразом многочисленных промышленных ядерных реакторов СССР. Кроме того, на нём удалось наработать плутоний, в количествах достаточных для надёжного определения его ядерно-физических характеристик.

В 1944 осуществлён пуск первого ядерного реактора на природном уране с тяжелой водой в качестве замедлителя (Аргоннская национальная лаборатория, США). Первый английский ядерный реактор сооружён в 1947, а 1948 - а французский ядерный реактор 20E – в 1948. Создание реакторов на быстрых нейтронах начато в СССР в 1949. В 1949 осуществлён пуск первого советского тяжеловодного реактора (А.И.Алиханов).

В 1951 в США состоялся пуск первого экспериментального реактора-размножителя EBR-1 с расширенным воспроизводством топлива (бридерный реактор), от которого впервые получена электрическая энергия (Аргоннская национальная лаборатория, В.Зинн). В 1955 пущен в эксплуатацию первый советский экспериментальный реактор на быстрых нейтронах БР-1, а в 1960 построен импульсный реактор на быстрых нейтронах (И.М.Франк, Д.И.Блохинцев).

В настоящее время ядерные реакторы используют для выработки энергии (тепловой и электрической) на АЭС, подводных и надводных судах, космических аппаратах, в госпиталях, а также для научных и



военных целей, воспроизводства ядерного топлива, наработки коммерческих изотопов, опреснения морской воды и т.п.

Интересно здесь упомянуть обнаружение в трёх отдельных рудных отложениях шахты в Окло (Габон, Западная Африка) обнаружено пятнадцать естественных ядерных реакторов (Ф.Перрин, Франция). Эти реакторы действовали 150 миллионов лет назад, и выработали 100 киловатт энергии. Теоретически природный реактор предсказал Р.Куроода (США) в 1956.

Первое мирное использование атомной энергии случилось в Айдахо национальной лаборатории (США), где первый атомный реактор на быстрых нейтронах, (бридер, EBR-1) в 1951 выдал энергию, достаточную для запуска генератора электрического тока. В результате была включена гирлянда электрических лампочек, осветившая новогоднюю ёлку.

Создание АЭС прошло следующие этапы:

**1951** - генератор электричества впервые запущен от энергии атомного реактора (экспериментальный бридерный реактор, EBR-1, Арко, США).

**1954** – начало работы Обнинской АЭС («игрушечная» АЭС небольшой электрической мощности в 5 МВт).

**1956** – начало работы первой коммерческой АЭС (Колдер Холл, Англия, первая в мире «реальная» АЭС – электрическая мощность 46 Мвт).

**1957** – начало работы энергетического реактора Шипингпорт, США, электрическая мощность 60 Мвт.

**1958** - введение в эксплуатацию 1-ой очереди Сибирской АЭС мощностью 100 Мвт (полная проектная мощность 600 Мвт).