И.Н.Бекман

ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ

Курс лекций

Лекция 1. **ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ ЯДЕРНОЙ ИНДУСТРИИ**

Содержание

1. Атомно-молекулярное учение **1**
2. Атомная физика **2**
3. Элементарные частицы **2**
4. Строение ядра **4**
5. Квантовая механика **5**
6. Теория относительности **10**
7. Радиоактивность **11**
8. Радиохимия **15**
9. Ионизирующие излучения и их взаимодействие с веществом **19**
10. Методы измерений **22**
11. Ускорители **24**
12. Ядерные реакции **26**
13. Ядерные реакторы **26**
14. Развитие Периодической системы элементов **28**
15. Разделение изотопов **30**
16. Космические лучи **30**
17. Плазма и термоядерный синтез **31**

История создания и развития ядерной индустрии связана с открытием и детальным изучением явления радиоактивности, открытого в ходе целенаправленного исследования строения вещества: сначала молекул и атомов, а затем – ядра и элементарных частиц.

В данной лекции мы рассмотрим историю создания фундаментальных основ ядерной индустрии. История развития самой ядерной индустрии в разных странах будет представлена в следующей лекции.

1. Атомно-молекулярное учение

Атомизм *или атомное учение – учение о прерывистом, дискретном строении материи.*

Представление о том, что мир состоит из фундаментальных частиц, имеет долгую историю. Гипотеза о том, что все вещества состоят из мельчайших элементарных частиц – атомистическая гипотеза – возникла еще в Древней Греции и развивалась Левкиппом, Демокритом и Эпикуром (5 – 3 вв. до н. э.). Именно Демокрит назвал частицы атомами, т.е. неделимыми частицами. Более конкретные представления об атомах выработались значительно позже, в результате развития физики и химии, базирующегося на научном эксперименте. В 17 в. Р.Бойль положил атомистику в основу своих химических представлений и объяснил все химические изменения соединением и разъединением атомов. Важную роль атомистика играла в работах И.Ньютона. Начиная с конца в результате быстрого развития химии (работы А.Лавуазье, Ж.Пруста, К.Бертолле и др.) была заложена основа количественных аспектов атомистического учения. Дж. Дальтон сформулировал закон кратных отношений (1803), ввел понятие атомного веса и дал оценки атомных весов некоторых элементов. Ж. Гей-Люссаком был установлен объемных отношений закон (1808), для объяснения которого А.Авогадро в 1811 ввел представление о молекуле, как состоящей из атомов наименьшей частице вещества, способной к самостоятельному существованию; он предположил, что в равных объемах любых газов при одних и тех же условиях заключается одинаковое число молекул (Закон Авогадро).

Однако взгляды Авогадро лишь постепенно, в середине 19 в. завоевали признание химиков. Четкие определения понятий атома и молекулы были даны С.Каниццаро в 1858 и приняты в 1860 на съезде химиков в Карлсруэ.

Молекула *– наименьшая частица вещества, которая способна существовать самостоятельно и не может дробиться дальше без потери основных химических свойств данного вещества.*

Атом *– мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства.*

2. Атомная физика

Атомная физика *- раздел физики, в котором изучаются строение и состояния атомов* возникла в начале 20 века. До её появления атом большинством учёных считался неделимым.

Тем не менее, уже в 30-е годы 19 века в теории электролиза, развитой М.Фарадеем, появилось понятие иона, и было выполнено измерение элементарного заряда. В 1833 при исследовании явления электролиза он установил, что ток в растворе электролита это упорядоченное движение заряженных частиц – ионов. Фарадей определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом. Приближенное значение которого оказалось равным $e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл. На основании исследований Фарадея можно было сделать вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов. В 1887 С.Аррениусом была сформулирована теория электролитической диссоциации.

После открытия радиоактивности (А.Беккерель, 1896) и электрона (1897, Дж.Дж.Томсон) стало очевидно, что атом – система заряженных частиц. Решающее значение для развития представлений о строении атома имело создание квантовой теория излучения (М.Планк, 1900). В 1902 разработана первая модель строения атома: положительный заряд равномерно распределен по всему объему атома; внутри этого положительно заряженного облака находятся электроны, группирующиеся (если их больше одного) в определенные устойчивые конфигурации (В.Томсон). В 1903 В.Томсон уточнил модель, создав слоистую теорию строения атома. В 1911 А.Гааз предложил модель атома, в которой впервые квантовый характер излучения был связан со структурой атома.

В 1911 Э.Резерфорд создал планетарную модель атома (вокруг тяжёлого положительно заряженного ядра вращаются электроны). Первую квантовую теорию на основе этой модели и с учётом опыта Франка-Герца (доказательство, что внутренняя энергия атома может принимать лишь дискретные значения) дал в 1913 Н. Бор. Теория Бора базируется на планетарной модели атома, квантовых представлениях и некоторых постулатах. Эта теория объяснила спектры водорода и водородоподобных атомов, но не годилась для атомов с числом электронов ≥ 2. Последовательная теория атома создана позднее на основе квантовой механики.

Бора постулаты *– основные допущения в квантовой теории атома Н.Бора (1913): 1) существование ряда стационарных состояний атома, соответствующих определённым значениям его внутренней энергии E; 2) условие частот ν излучения при переходе атома из одного стационарного атома (E_1) в другое (E_2): $\nu=(E_1-E_2)/h$, где h – постоянная Планка. Позднее установлено, что постулаты Бора – следствия квантовой механики.*

Что касается молекул, то окончательное доказательство реальности их существования было получено в экспериментах по исследованию броуновского движения (Ж.Перрен, 1908). - Объяснение броуновского движения на основе молекулярно-кинетической теории дано А.Эйнштейном и М.Смолуховским в 1906. Непосредственное измерение скорости молекул проведено О.Штерном в 1919.

3. Элементарные частицы

Элементарные частицы – мельчайшие известные частицы физической материи.

Характерная особенность элементарных частиц – способность к взаимным превращениям - не позволяет рассматривать элементарные частицы как простейшие, неизменные «кирпичики мироздания», подобно атомам Демокрита. Число частиц, которые называются в современной теории элементарными очень велико. Каждая элементарная частица (за исключением истинно нейтральных частиц) имеет свою античастицу. Всего вместе с античастицами к началу 21 века

открыто более 350 частиц. К стабильным частицам относится фотон, электронное и мюонное нейтрино, электрон, протон и их античастицы; остальные элементарные частицы самопроизвольно распадаются за время от $\approx 10^3$ с для свободного нейтрона до 10^{-22} – 10^{-24} для резонансов. Современная терминология элементарных частиц (барионы, гипероны, лептоны) и соответствующая символика введены в 1953.

В 1900 М.Планк ввел квант действия – постоянную Планка. Фотон как квант электромагнитного излучения предложен в 1905 А.Эйнштейном. Экспериментальное доказательство существования фотона получено в 1923; теоретическая интерпретация явления испускания фотона дана А.Комптоном, П.Дебаем.

Электрон открыл в 1897 Дж.Дж.Томсон при изучении катодных лучей, он же измерил отношение заряда электрона к его массе. В 1910 удалось отдельно измерить заряд электрона (Р.Милликен). Постулат существования внутреннего механического и магнитного моментов у электрона (спиновая гипотеза) выдвинут С.Гаудсмитом, Дж. Уленбеком в 1925). Матрицы для описания спина электрона (спиновые матрицы) предложены В.Паули в 1927).

В открытии многих элементарных частиц (и античастиц) существенную роль сыграло обнаружение космического излучения (В.Гейс, 1918). Первая античастица (позитрон) была теоретически предсказана П.Дираком, Р.Оппенгеймером в 1928; они же предсказали возможность рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар. Экспериментально позитрон был открыт в космических лучах К.Андерсоном в 1932. Образование электрон-позитронных пар из жесткого гамма-кванта обнаружено супругами И. и Ф.Жолио-Кюри, К.Андерсоном, П.Блэкеттом и Дж.Оккиалини; механизм этого явления установил Р.Оппенгеймер в 1932. Открытие электронно-позитронных ливней в космических лучах произошло в 1933 (П.Блэкетт, Дж. Оккиалини). Гипотеза о существовании антивещества предложена П.Дираком в 1933. Экспериментальное доказательство аннигиляции электронов и позитронов получено в 1934.

Возможность существования протона в 1913 предсказал Э.Резерфорд. Он же открыл его, показав, что при бомбардировке азота альфа-частицами возникает кислород и протон. Тем самым была осуществлена первая искусственная ядерная реакций и получено доказательство наличия в ядрах элементов протонов. Д.Деннисон (1927) доказал существование спина протона. Точное измерение массы протона провёл У.Хаустон в 1927, а измерение магнитного момента протона О.Штерн и О.Фриш в 1933.

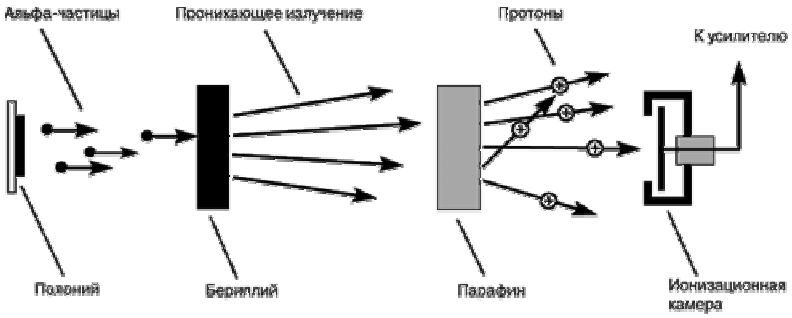


Рис. 1. Эксперимент Чедвига, схема процесса, в котором был открыт нейтрон.

Э. Резерфорд предсказал существование нейтрона в 1921. Возникновение сильнопроникающего излучения при бомбардировке α-частицами бериллия (нейтронов) наблюдали В.Боте и Г.Беккер в 1930). В 1932 нейтрон был открыт Дж.Чэдвигом, который показал, что при бомбардировке ядра бериллия-9 альфа-частицами возникает углерод-12 и нейтрон. Он же впервые вычислил его массу. Схема образования нейтрона при облучении бериллия α-частицами предложена И. и Ф. Жолио-Кюри. Медленные нейтроны открыты П.Оже в 1933. Точное измерение массы нейтрона проведено Х. Юкава Дж. Чэдвиком и М.Гольдхабером в 1935; они же предсказали его бета-распад на протон, электрон и нейтрино. Период полураспада нейтрона достаточно точно измерил Дж. Робсон в 1951.

Гипотеза существования нейтрино высказана В.Паули в 1930. Название «нейтрино» для нейтральной частицы В.Паули предложено Э.Ферми в 1932. Свойства нейтрино подробно

рассмотрены В.Паули. Доказательство того, что масса нейтрино равна нулю получено Э.Ферми и Ф.Перреном в 1933. Первый успешный косвенный опыт по доказательству существования нейтрино (регистрировались ядра отдачи, возникающие вследствие испускания нейтрино при захвате орбитальных электронов) получено Дж.Алленом в 1942. Метод детектирования нейтрино в реакции $^{37}C + \nu \rightarrow {}^{37}Ar + e^{-}$ предложен Б.М.Понтекорво в 1945.

В 1937 произошло открытие в космических лучах частиц с массой в 207 электронных масс - мюонов **(**μ-мезонов**).** В 1938 Х. Юкава, С.Саката и М.Такетани ввели понятие нейтрального мезона для объяснения зарядовой независимости ядерных сил. Открытие мю-мезона (К.Андерсон и С.Неддермейер) произошло в 1938; они наблюдали частицу космических лучей, остановившуюся в камере Вильсона после прохождения металлической пластинки, и определили ее массу ~ 240 m_e. Нестабильность мезона космических лучей открыта Г.Куленкампфом, а прямое подтверждение спонтанного распада μ^{+} мезона дано в 1940. В том же году С.Томонага и Дж. Араки предсказали существование мезоатомов. Измерение времени жизни покоящегося мезона проведено Ф.Разетти в 1941. Искусственно мезоны получили Э.Гарднер и Ч.Латтес в 1948.

В 1963 была выдвинута гипотеза кварков, как «кирпичиков» строения элементарных частиц (М.Гелл-Манн, Дж, Цвейг). Американские физики Джером Фридман и Генри Кендалл и канадский физик Ричард Тейлор провели основополагающие исследования кварковой структуры элементарных частиц (Нобелевская премия 1990).

4. Строение ядра

Начало реалистичной модели строения атома положили опыты Г.Гейгера по изучению рассеяния альфа частиц на тонких фольгах, начатые им в 1908. Анализируя результаты этих экспериментов, Э.Резерфорд в 1911 создал теорию рассеяния альфа-частиц в веществе, открыл атомное ядро и создал планетарную модель строения атома.

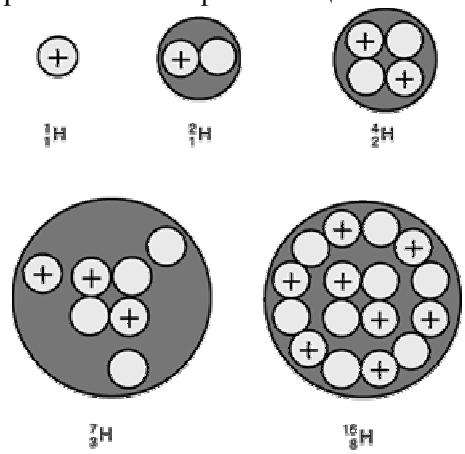


Рис.2. Схема структуры пяти легких ядер.

Первая гипотеза строения атомных ядер из протонов и электронов (протонно-электронная гипотеза) предложена А.Ван ден Бруком в 1913. В том же году П.Ланжевен вводит понятие дефекта массы (в 1927 получено экспериментальное доказательство, что масса ядра не равна сумме масс входящих в ядро частиц, а меньше этой величины на несколько десятых процента (Ф.Астон)). В 1919 впервые были оценены размеры ядра, в 1922 размеры ядер атомов были определены достаточно точно. В 1923 введено понятие магнитного момента ядер и объяснена сверхтонкая структура спектральных линий в рамках гипотезы ядерного спина (В.Паули). Экспериментальное определение моментов и спинов ядер, а также точное измерение массы протона (У.Хаустон) проведено в 1927. В 1928 удалось определить статистику ядра азота; оказалось, что она подчиняется статистике Возе – Эйнштейна. Произошла «азотная катастрофа» - был получен решающий довод против протонно-электронной гипотезы строения ядер (В.Гайтлер, Г.Герцберг, Ф.Розетти).

В 1930 получено доказательство, что ядра с нечетным атомным числом подчиняются статистике Ферми – Дирака, а с четным – статистике Бозе – Эйнштейна (теорема П.Эренфеста – Р.Оппенгеймера); высказана гипотеза об отсутствии в ядре электронов (В.А.Амбарцумян, Д.Д.Иваненко); обнаружено существование нового типа взаимодействий – сильных, или ядерных. В 1932 предложена протонно-нейтронная модель ядра (В.Гейзенберг, Д.Д.Иваненко); введено представление об обменном характере ядерных сил (В.Гейзенберг); показано, что

ядерные силы являются насыщающими (В.Гейзенберг, Э.Майорана). В 1933 высказано предположение, что особенно высокой устойчивостью обладают ядра с числом протонов или нейтронов, равным 2, 8, 20, 50, 82 и 126, – «магическими числами» - основа идеи оболочечной модели ядра (В.М.Эльзассер). В 1933 измерен магнитный момент дейтрона (О.Штерн, И.Эстерман) и протона (О.Штерн и О.Фриш). Тогда же показано, что ядерные силы имеют малую область действия, но в этой области они в миллионы раз больше электростатических сил в атоме (Ю.Вигнер). В 1934 проведён расчет по уравнению Шредингера последовательности заполнения ядерных уровней (В.Эльзассер, 1934, М.Гепперт-Майер, 1958). В 1935 для прояснения сущности ядерных сил введён постулат существования сильно взаимодействующего кванта ядерного поля (мезона) – частицы, осуществляющей взаимодействие между нуклонами - мезонная теория ядерных сил (Х.Юкава). К.Вейцзеккер предложил полуэмпирическую формулу для энергии связи ядра, а Г.Шюлер и Т.Шмидт обнаружили квадрупольный момент ядра. В 1936 закончено создание капельной модели ядра (Н.Бор, Я.И.Френкель) и теории составного ядра – обобщённая модель компаунд-ядра (Оге Бор); выдвинута гипотеза зарядовой независимости ядерных сил (Г.Брейт, Э.Кондон, Р.Презент); объяснено существование метастабильных состояний ядер (К.Вейцзеккер). В 1937 установлена зависимость между магнитными моментами и спинами ядер (модель Т.Шмидта); предложена однородная модель ядра (модель Ю.Вигнера); установлена связь изотопического спина с зарядовой независимостью ядерных сил (Ю.Вигнер). 1938 ознаменовался скалярной теорией ядерных сил (Х. Юкава, С.Саката) и векторной теорией Г.Фрелих, В.Гайтлер, Н.Кеммер); Х. Юкава, С.Саката и М.Такетани ввели понятие нейтрального мезона для объяснения зарядовой независимости ядерных сил. В 1939 предложена капельная модель ядра: на первом этапе - качественная теория деления ядер (Н.Бор), а на втором - количественная теория деления ядер (Н.Бор, Дж. Уиллер). В том же году Белинфант ввел термин нуклон. И.Раби измерил квадрупольный момент дейтрона.

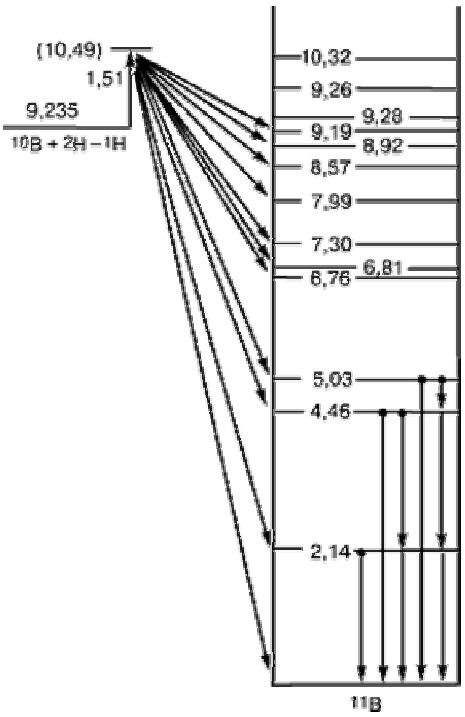


Рис.3. Уровни энергии ядра ^{11}B. Энергия возбуждения ядра ^{11}B выражена в МэВ.

В 1940 В.Вайскопф разработал статистическую модель ядра. В 1941 Г.Вентцель предложил теорию сильной связи для случая скалярного поля Юкавы и предсказал нуклонную изобару. В 1949 был экспериментально подтвержден обменный характер ядерного взаимодействия между протоном и нейтроном (Бракнер). В 1948 дано обоснование существования «магических ядер» (М.Гепперт-Майер); существование сильного спин-орбитального взаимодействия между нуклонами, что просто объяснило магические числа; гипотеза о существовании универсального слабого взаимодействия и кванта этого взаимодействия – W^+ бозона (О.Клейн, Т.Ли, Дж. Пуппи, Дж. Уилер). В 1949 **с**оздана оболочечная модель ядра (М.Гепперт-Майер. Х.Йенсен). В 1949 был экспериментально подтвержден обменный характер ядерного взаимодействия между протоном и нейтроном (Бракнер); построена коллективная модель ядра (О.Бор, Б.Моттельсон); предложена сфероидальная модель ядра (Дж. Рейнуотер). В 1951высказана идея о существовании отталкивания между нуклонами на малых расстояниях (Р.Ястров). В 1955 предложена модель деформированных ядерных оболочек (Дж. Нильссон).

5. Квантовая механика

Современная квантовая теория объединяет квантовую механику, квантовую статистику и квантовую теорию поля. Квантовая (волновая) механика - теория, устанавливающая способ

описания и закономерность движения микрочастиц в заданных внешних полях. Квантовая механика впервые позволила описать структуру атомов и понять их спектры, установить природу химической связи, объяснить периодическую систему элементов и т.д.

Планка закон излучения *– устанавливает распределение энергии в спектре абсолютно чёрного тела (равновесного теплового излучения). выведен М.Планком в 1900.*

Планка постоянная *(квант действия) – основная постоянная квантовой теории. Названа по имени М.Планка. Планка постоянная* $h=6,626*10^{-34}$ *Дж*с. Часто применяется величина* $\hbar=h/2\pi=1,0546*10^{-34}$ *Дж*с, также называемая постоянной Планка.*

Квантовая механика, как целое, была создана в 1924 – 26 трудами Л. Де-Бройля, Э.Шредингера, В.Гейзенберга и П.Дирака. Важнейшую роль в её исторической подготовке и последующей разработке сыграли исследования М.Планка, А.Эйнштейна, Н.Бора, М.Борна и др.

Можно выделить следующие этапы в хорологии развития квантовой механики:

1900 - Квантовая теория излучения предложена М.Планком.

1905 - Понятие фотона - кванта электромагнитного поля, гипотеза о квантовом характере светового излучения (фотонная теория света) (А.Эйнштейн). Объяснение законов фотоэффекта на основании существования квантов света, или фотонов (А.Эйнштейн). Закон взаимосвязи массы и энергии (А.Эйнштейн).

1906 - Получение выражения для энергии и импульса электрона (М.Планк). Открытие спектральной серии атома водорода (серия Т. Лаймана).

1907 - Разработка первой квантовой теории теплоемкости твердых тел (А.Эйнштейн).

1908 - Улучшение предложенных в 1888 И.Ридбергом приближенных формул для частот спектральных серий; установление одного из основных принципов систематики атомных спектров – комбинационный принцип (принцип Ридберга – Ритца) (В.Ритц). Обнаружение спектральной серии атома водорода в инфракрасной области (серия Ф.Пашена).

1911 - Разработка модели атома, в которой впервые связан квантовый характер излучения со структурой атома (А.Гааз).

1911 - Открытие атомного ядра, создание планетарной модели строения атома (Э.Резерфорд). Обнаружение, что постоянная Планка имеет размерность механического действия и предложил произвести квантование действия в ряде задач (А.Зоммерфельд). Постулирование кванта магнитного момента – магнетона (П.Вейс). Независимо от П.Вейсса магнетон предсказал П.Ланжевен и вычислил его величину.

1912 - Проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и вычисление из него постоянной Планка (Р.Милликен). Формулировка основного закона фотохимии (закон А.Эйнштейна).

1913 - Открытие явления расщепления спектральных линий в электрическом поле; применение идеи квантования энергии к теории планетарного атома, формулировка трех квантовых постулатов, характеризующих особенности движения электронов в атоме; первая квантовая теория атома водорода; введение главного квантового числа; условие существования стационарных состояний атома; условие частот излучения (Н.Бор). Теория магнитных спектров, основы магнитной спектроскопии (В.К.Аркадьев). Экспериментальное доказательство существования дискретных уровней энергии атомов (опыты Дж. Франка – Г.Герца).

1914 - Объяснение возникновения рентгеновских спектров излучения, исходя из представлений об электронных оболочках атома, которые создают вокруг ядра последовательные слои (В.Коссель). Формула для уровней энергии атома (Н.Бор).

1915 - Усовершенствование теории атома Бора, распространение ее с просто периодических на случай многократно периодических систем; разработка квантовой теории эллиптических орбит (теория Бора – Зоммерфельда); введение радиального и азимутального квантового числа (А.Зоммерфельд). Построение теории тонкой структуры водородного спектра (А.Зоммерфельд). Разработка теории химической связи в органических соединениях; гипотеза валентных электронов.

1916 - Статистическая электронная теория строения атомов и молекул (В.Коссель, Г.Льюис). Завершение построения квантовой теории эффекта Зеемана (А. Зоммерфельд, П.Дебай). Объяснение на базе теории атома Бора химических взаимодействий, в том числе - гетерополярных молекул (В.Коссель). Доказательство квантования компоненты момента количества движения в направлении поля; введение понятия магнитного квантового числа (П.Дебай и А.Зоммерфельд). Общая квантовая теория многократно периодических систем (П.С.Эпштейн, К. Шварцшильд).
1918 - Формулировка принципа соответствия (Н.Бор).
1919 - Спектроскопический закон смещения (В.Коссель, А.Зоммерфельд). Введение внутреннего квантового числа и основанных на нем правил отбора для дублетных и триплетных спектров (А.Зоммерфельд).
1921 - Строение атомов – связь периодичности их химических и спектральных свойств с характером формирования электронных конфигураций по мере роста заряда ядра (Н.Бор). Построение теории аномального эффекта Зеемана (А.Ланде).
1922 - Согласование корпускулярных и волновых свойств излучений в рамках единой теории – корпускулярно-волновой дуализм, идея дифракции электрона (Л. Де Бройль). Разработка систематики сложных спектров (А.Ланде, Ф.Хундом, Г.Рассел). Открытие явление холодной электронной эмиссии при воздействии сильного электрического поля (Дж. Лилиенфельд). Объяснение этого явления на основе электронного туннелирования дали в 1928 Р.Фаулер и Л.Нордгейм). Введение понятие мультиплетов (М.Каталан). Экспериментальное доказательство, что магнитный момент электрона в атоме приобретает лишь дискретные значения (пространственное квантование); первые экспериментальные методы измерения атомных и молекулярных моментов (О.Штерн и В.Горлах). Открытие спектральной серии атома водорода в инфракрасной области (серия Ф.Брэкетта).
1923 - Принцип запрета Паули - один из важнейших принципов современной теоретической физики (В. Паули). Магнитный момент ядер; объяснение сверхтонкой структуры спектральных линий в рамках гипотезы ядерного спина (В.Паули). Идея о волновых свойствах материи (волны де Бройля). Эта идея Л. де Бройля о всеобщности корпускулярно-волнового дуализма легла в основу квантовой механики Шредингера. Открытие явления рассеяния коротковолнового излучения на свободном или слабо связанном электроне (эффект А. Комптона); экспериментальное доказательство существования фотона, постулированного в 1905 А.Эйнштейном; теоретическая интерпретация этого явления (А.Комптон, П.Дебай). Представление об оболочечной структуре атома, основанное на классификации электронных орбит по главному и азимутальному квантовым числам (Н.Бор). Разработка теории периодической системы химических элементов Н.Бор.
1924 - Квантовая статистика частиц с целым спином (статистика Бозе – Эйнштейна). Гипотеза Нернста о существовании вырождения газа превратилась в обоснованное теоретическое утверждение (Ш.Бозе, А.Эйнштейн). Закон сохранения пространственной четности применительно к процессу испускания света атомами (О.Лапорт). Существование отрицательных дисперсионных членов для атомов в возбужденных состояниях (Х.Крамере).
1925 - Формулировка в физической химии квантовомеханического принципа Дж.Франка – Э.Кондона. Новый тип взаимодействия электронов в атоме (связь Г.Рассела – Ф.Саундерса). Идея использования кристалла для наблюдения дифракции электронов и доказательства их волновой природы (В.М.Эльзассер). Формулы для интенсивностей мультиплетных линий (А.Зоммерфельд, Р.Кронинг). Разработка матричной механики (В.Гейзенберг). Теория поляризованной люминесценции, установление формулы Левшина – Перрена (В.Л. Левшин). Постулат существования внутреннего механического и магнитного моментов у электрона (спиновая гипотеза). (С.Гаудсмит, Дж. Уленбек). Получение с помощью принципа соответствия полной формулы дисперсии, включающую комбинационное рассеяние (формула дисперсии Крамерса –

Гейзенберга) (Х.Крамерс, В. Гейзенберг). Подразделение электронных оболочек атома на подоболочки (Э.Стонер).

1926 - Построение волновой механики; уравнение Шредингера; общее представление о туннельном эффекте; доказательство эквивалентности матричной механики В.Гейзенберга и волновой механики (Э.Шредингер). Квантовая статистика, описывающая поведение частиц с полуцелым спином (Э.Ферми, П.Дирак, 1926). Соотношение неопределенности (В.Гейзенберг). Статистическая модель атома (Э.Ферми, Л.Томсон). Связь квантовой механики с теорией относительности, вывод волнового уравнения, составляющего основу релятивисткой квантовой механики (П.Дирак). Разработка теории преобразований (П.Дирак). Формулировка дисперсионных соотношений (соотношения Х.Крамерса – Р.Кронига). Квантовомеханическая теория диамагнетизма (Дж. Ван Флек, Л.Полинг). Простейшее релятивистское волновое уравнение для частиц со спином 0 – уравнение Клейна – Фока – Гордона (О.Клейн, В.А.Фок, В.Гордон). Метод нахождения приближенных собственных значений и собственных функций одномерного уравнения Шредингера, устанавливающий связь со старыми правилами квантования Бора и Зоммерфельда (метод БВК, Л.Бриллюэн, Г.Вентцель, Х.Крамере). Вероятностная интерпретация волн де Бройля (М.Борн). Общий принцип, согласно которому физической величине соответствует некоторый оператор (М.Борн, Н.Винер). Приближенный метод решения задачи о рассеянии частиц силовым центром (борновское рассеяние, М.Борн).

1927 - Матрицы для описания спина электрона (спиновые матрицы В.Паули). Введение понятия упаковочного коэффициента и построение первой кривой зависимости упаковочных коэффициентов от массовых чисел, характеризующей энергию связи атомных ядер (Ф.Астон). Теория валентных связей, положившей начало квантовой химии (Ф.Лондон, В.Гайтлер). Применение вариационного метода в квантовой механике для расчета нормального состояния гелия (получения энергетических уровней атома) (Кельнер). Концепция волны-пилота с целью интерпретации квантовой механики (Л. де Бройль). Схема описания и расчета основного состояния многоэлектронных атомов (модель атома Л.Томаса – Э.Ферми). Теория строения двухатомных молекул (М.Борн, Р.Оппенгеймер). Индетерминистская концепция элементарных процессов, т.е. копенгагенская интерпретация квантовой механики (Н.Бор, В.Гейзенберг, Э.Шредингер, М.Борн, В.Паули, П.Дирак). Сформулирован принцип дополнительности (Н.Бор).

- Открытие дифракции электронов (К.Дэвиссон, Л.Джермер, Дж. П.Томсон). Зависимость квантового выхода люминесценции от длины волны возбуждающего излучения (закон С.И.Вавилова). Открытие зеркальной симметрии и формулировка закона сохранения четности; введение представления о четности волновой функции (Ю.Вигнер). Применение принципов квантовой теории к максвелловскому полю и получение первой модели квантованного поля (П.Дирак). Разработка метода вторичного квантования (П.Дирак, В.А.Фок) Парамагнетизм электронного газа (парамагнетизм В.Паули). Создание квантовой теории излучения, предсказание тождественности квантов вынужденного и первичного излучений, лежащей в основе квантовой электроники (П.Дирак). Установление двух эмпирических правил, которые определяют последовательность расположения атомных уровней в мультиплетах (правила Ф.Хунда). Первое использование в квантовой механике теории групп; построение аппарата, эквивалентного волновой механике в конфигурационном пространстве с антисимметричными волновыми функциями. (Ю.Вигнер).

1928 - Первая квантовая теория металлов (А.Зоммерфельд). Метод решения задач квантовой механики многих тел – метод самосогласованного поля (метод Дж.Хартри – В.А.Фока). Объяснение сверхтонкой структуры спектров (В.Паули). Открытие сверхтонкой структуры спектральных линий атомных спектров (А.Н.Теренин, Л.Н.Добрецов, Г.Шюллер). Открытие обменного взаимодействия (П.Дирак и В.Гейзенберг). Соединение квантовой механики с теорией относительности и установление квантовомеханического уравнения, описывающего релятивистский электрон; создание релятивистской квантовой механики (П.Дирак). Построение квантовой теории оптической активности паров (Л.Розенфельд). Разработка Ф.Блохом и

Л.Вриллюэном основ зонной теории твердых тел (Ф.Блох, Л.Бриллюэн). Теория движения отдельных электронов в кристаллической решетке (Ф.Блох и Р.Пайерлс). Метод линейной комбинации атомных орбит; приближение сильной связи (Ф.Блох). Квантование электронного поля (Ю.Вигнер).

1929 - Первая попытка формулировки квантовой электродинамики - ввод общей схемы квантования полей (В.Гейзенберг, В.Паули). Первая количественная теория взаимодействия ядерного магнитного момента с электронной оболочкой (Э.Ферми, Харгревс). Попытка построения квантовой электродинамики (подход, отличный от схемы В.Гейзенберга и В.Паули), на основе канонических правил квантования поля (Э.Ферми). Детерминанты Дж.Слэтера. Открытие дифракции атомов и молекул (О.Штерн). Теория кристаллического поля (Х.Бете). Создание квантовой теории эффекта Комптона; уравнение, описывающее рассеяние электронов в этом эффекте (уравнение О.Клейна – И.Нишины).

1930 Введение спиновых волн (Ф.Блох). Квантовая теория рассеяния света в кристаллах (И.Е.Тамм). Предсказание существования элементарных магнитных зарядов – монополей (П.Дирак). Теоретическое предсказание диамагнетизма электронов в металлах (диамагнетизм Л.Д.Ландау). Точное измерение времени жизни возбужденных атомов (для He+).

1932 - Методы описания систем с переменным количеством частиц (метод пространства В.А.Фока и метод функционалов Фока). Введение понятия изотонического спина как формального математического приема (В.Гейзенберг). Введение основных соотношений метода вторичного квантования и развитие метода конфигурационного пространства для систем с переменным числом частиц (В.А.Фок). Доказательство эквивалентности электродинамики Дирака и Гейзенберга – Паули (Л.Розенфельд). Открытие симметрии относительно обращения времени -закон сохранения временной четности (Ю. Вигнер). Новая форма релятивистской квантовой механики (П.Дирак). Разработка многовременного формализма, представляющего собой релятивистски инвариантную форму современной квантовой электродинамики (В.А.Фок, П.Дирак. Б.Подольский).

1933 - Разработка метода молекулярных орбиталей (Р.Милликен).

1936 - Идея квантового числа, соответствующего полному изотоническому спину (Б.Кассен, Э.Кондон). Запись уравнения для частиц со спином 1 и $m_0 \neq 0$ – уравнение А.Прока.

1937 - Формулировка теоремы условий устойчивости симметричных конфигураций молекул (теорема Г.Яна – Э.Теллера).

1940 - Доказательство теоремы о связи статистики и спина: система одинаковых частиц с полуцелым спином описывается антисимметричной волновой функцией (статистика Ферми – Дирака), а с целым спином – симметричной волновой функцией (статистика Бозе – Эйнштейна) (В.Паули).

1941 - Связь закона сохранения электрического заряда с инвариантностью относительно калибровочных преобразований (В.Паули).

1943 - Введение В.Гейзенбергом понятия матрицы рассеяния, или S-матрицы (впервые S-матрицу предложил в 1937 Дж. Уилер).

1945 - Предсказание переходного излучения (В.Л.Гинзбург, И.М.Франк, открыто в 1958).

- Приближенный метод в квантовой теории поля (метод И.Е.Тамма – С.М.Данкова).

1947 - Принцип перенормировки массы (Х. Крамере). Метод приближенного вторичного квантования (Н.Н.Боголюбов).

1948 - Завершение создания квантовой электродинамики (С.Томонага, Р.Фейнман, Ю.Швингер).

1949 - Метод перенормировок в квантовой электродинамике.

1951 - Полный анализ перенормировки в квантовой электродинамике (А.Салам).

1970 - Выдвинута гипотеза о существовании нового квантового числа очарования, или суперзаряда.

6. Теория относительности

Относительности теория - физическая теория, рассматривающая пространственно-временные свойства физических процессов. Так как закономерности, устанавливаемые теорией относительности – общие для всех физических процессов, то обычно о них говорят просто как о свойствах пространства-времени. Эти свойства зависят от полей тяготения в данной области пространства-времени. Теория, описывающая свойства пространства-времени в приближении, когда полями тяготения можно пренебречь, называется **специальной теорией относительности** (создана А.Эйнштейном в 1905). Свойства пространства-времени при наличии полей тяготения исследуются в **общей теории относительности**, называемой также теорией тяготения Эйнштейна (1915). Физические явления, описываемые теорией относительности, называются релятивистскими и проявляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме. Все выводы теории относительности надёжно подтверждены на опыте. Теория относительности выявила ограниченность представлений классической физики об «абсолютных» пространстве и времени, неправомерность их обособления от движущейся материи; она даёт боле точное, по сравнению с классической механикой, отображение объективных процессов реальной действительности.

Теория относительности предложена Эйнштейном, но в её разработке принимали участия многие учёные. Очень близко подошёл к созданию теории относительности нидерландский физик, нобелевский лауреат (1902), Хендрик Лоренц (1853-1928), который создал электродинамику движущихся сред и вывел преобразования, названные его именем. Герман Минковский (1864-1909), немецкий математик и физик, дал геометрическую интерпретацию специальной теории относительности (пространство Минковского). Достаточно серьёзный вклад в теорию относительности и релятивистскую электродинамику внёс французский физик Поль Ланжевен (1872-1946). Александр Александрович Фридман (1888-1925), математик и геофизик, в 1922-24 нашёл нестационарные решения уравнений тяготения Эйнштейна, что легло в основу теории нестационарной (расширяющейся) вселенной.

Относительности принцип *– фундаментальный физический закон, согласно которому любой процесс протекает одинаково в изолированной материальной системе, находящейся в состоянии покоя, и в такой же системе в состоянии равномерного прямолинейного движения. Состояния движения или покоя определяются по отношению к произвольно выбранной инерциальной системе отчёта. Относительности принцип лежит в основе специальной теории относительности Эйнштейна.*

1905: Понятие фотона - кванта электромагнитного поля, гипотеза о квантовом характере светового излучения (фотонная теория света) (А.Эйнтштейн); объяснение законов фотоэффекта на основании существования квантов света, или фотонов (А.Эйнштейн); ковариантность уравнений Максвелла относительно «группы Лоренца» (А.Пуанкаре, А.Эйнштейн); закон взаимосвязи массы и энергии (А.Эйнштейн); специальный принцип относительности и принцип постоянства скорости света, создание специальной теорию относительности, содержащей новые пространственно-временные представления (А.Эйнштейн).

1906: Вывод уравнения релятивистской динамики, получение выражения для энергии и импульса электрона, ввод термина «теория относительности» (М.Планк).

1907: Принцип эквивалентности гравитации и инерции, являющийся фундаментом общей теории относительности, вычисление красного смещения света в поле тяготения Солнца (А. Эйнштейн); формулировка точных инвариантные уравнения поля для движущихся тел (Г.Минковский); обобщение термодинамики в рамках специальной теории относительности (М.Планк, А.Эйнштейн); разработка первой квантовой теории теплоемкости твердых тел (А.Эйнштейн).

1908: Окончательное подтверждение справедливости релятивистской формулы Лоренца для зависимости массы от скорости (А.Бухерер); идея объединения трех измерений пространства и

времени в одно четырехмерное пространство (пространство Минковского) и развитие современного четырехмерного аппарата теории относительности (Г.Минковский).
1911: Доказательство искривления световых лучей в поле тяготения Солнца (А. Эйнштейн).
1912: Теория гравитации, обобщающая закон тяготения Ньютона в соответствии с требованиями специальной теории относительности и принципом эквивалентности (Дж. Нордстрем); теория гравитации, обобщающая закон Ньютона, но не учитывающая принцип эквивалентности (М.Абрагам); проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и вычисление из него постоянной Планка (Р.Милликен); формулировка основного закона фотохимии (закон А.Эйнштейна).
1913: Отождествление гравитационного поля с 10-компонентным метрическим тензором геометрии Римана; теорию тяготения, учитывающая принцип эквивалентности (А.Эйнштейн, М.Гроссман); понятие дефекта массы (П.Ланжевен); Теория тяготения, основывающаяся на специальной теории относительности, но не удовлетворяющая принципу эквивалентности (Г.Ми).
1916: Выход работы А.Эйнштейна «Основы общей теории относительности», завершившей создание релятивистской теории гравитации; первое решение уравнения тяготения Эйнштейна, описывающее гравитационное поле сферической массы (решение К.Шварцшильда); постулирование гравитационных волн (А.Эйнштейн); вывод вероятности спонтанного и вынужденного излучений (А.Эйнштейн).
1917: Космологическая модель Вселенной (модель В. де Ситтера).
1918: Формула для мощности гравитационного излучения (А.Эйнштейн); первый вариант единой теории поля, основанный на обобщении римановой геометрии (Г.Вейль); идея объединенного описания всех полей и всего вообще вещества на базе геометризированной картины мира – единая теория толя (Г.Вейль, Э.Картан, А.Эддингтон, А.Эйнштейн).
1919: Первая экспериментальная проверка отклонения света звезды в поле тяготения Солнца, предсказанного общей теорией относительности (А.Эддингтон).
1922: Нестационарные решения гравитационного уравнения Эйнштейна; предсказание расширения Вселенной (нестационарная космологическая модель), подтвержденное в 1929 открытием явления разбегания галактик (А.А.Фридман).
1923: Первый вариант единой теории поля (А.Эйнштейн).
1924: Квантовая статистика частиц с целым спином (статистика Бозе – Эйнштейна).
1941: Подтверждение релятивистского эффекта Допплера (Г.Айве, Дж. Стиллуэлл).

7. Радиоактивность

Радиоактивность *– самопроизвольное превращение неустойчивых ядер в ядра других элементов, сопровождающееся испусканием частиц или других гамма-квантов.*

О факте испускания солями урана таинственного излучения впервые сообщили французы Ньепс (1858) и Сент-Виктор (1867), но их наблюдения не стали открытием и были забыты. Поэтому справедливо полагают, что явление радиоактивность открыл А.Беккерель в 1896.

В 1895 французский физик **Антуан-Анри Беккерель** (его отец, Александр Эдмон, и его дед, Антуан Сезар, специалисты в области люминесценции и фосфоресценции были известными учеными, профессорами физики, членами Французской академии наук), зав кафедрой физики в Политехнической школе (Париж), заинтересовался рентгеновскими лучами, обладающими большой энергией и проникающей способностью. Это излучение возникает, когда катодные лучи (электроны), испускаемые отрицательным электродом (катодом) электронно-вакуумной лампы, ударяют в другую часть лампы во время высоковольтного разряда. Поскольку падающие катодные лучи вызывают также люминесценцию, то ошибочно предполагалось (гипотеза Пуанкаре), что и люминесценция, и рентгеновские лучи образуются посредством одного и того же механизма и что люминесценция может сопровождаться рентгеновскими лучами. Беккерель решил выяснить, может ли флюоресцентный материал, активированный светом, а не катодными лучами, также испускать рентгеновские лучи. Он поместил на фотографические пластинки,

завернутые в плотную черную бумагу, люминесцентный материал, имевшийся у него под рукой - сульфат уранил-калия ($UO_2SO_4*K_2SO_4*2H_20$) - и в течение нескольких часов подвергал этот пакет воздействию солнечного света. Он обнаружил, что излучение прошло сквозь бумагу и воздействовало на фотографическую пластинку, что указывало на то, что соль урана испускала рентгеновские лучи, а также и свет после того, как была облучена солнечным светом. Однако, к удивлению Беккерель, оказалось, что то же самое происходило и тогда, когда такой пакет помещали в темное место, без облучения солнечным светом. Беккерель, по-видимому, наблюдал результат воздействия не рентгеновских лучей, а нового вида проникающей радиации, испускаемой без внешнего облучения источника. На протяжении нескольких последующих месяцев Беккерель повторял свой опыт с другими известными люминесцентными веществами и обнаружил, что одни лишь соединения урана испускают открытое им самопроизвольное излучение. Кроме того, нелюминесцентные соединения урана испускали аналогичное излучение, и, следовательно, оно не было связано с люминесценцией. В мае 1896 г. Беккерель провел опыты с чистым ураном и обнаружил, что фотографические пластинки показывали степень почернения, в три-четыре раза превышающую таковую от первоначально использовавшейся соли урана. Загадочное излучение являлось присущим урану свойством.

В течение нескольких последующих лет благодаря исследованиям Беккереля и других ученых было обнаружено, что мощность излучения, по-видимому, не уменьшается со временем. В 1900 г. Беккерель пришел к выводу, что эти лучи частично состоят из электронов, открытых в 1897 г. Дж. Томсоном в качестве компонентов катодных лучей.

В 1898 М. Склодовская-Кюри и Г.Шмидт (не зависимо друг от друга) открыли, что торий также испускает лучи Беккереля. В том же году М. и П. Кюри с помощью электрометра установили, что радиоактивность урановых минералов больше, чем радиоактивность урана в них содержащегося. По-видимому, в урановых минералах содержится какой-то значительно более радиоактивный элемент, чем уран. Им удалось выделить из урановой руды два новых радиоактивных элемента: полоний и радий. В 1901 М.Кюри ввела термин «радиоактивность».

Практически сразу была обнаружена способность излучения от солей радия преобразовывать кислород в озон, вызывать потемнение стекла, а также изменять цвет кристаллов платиносинеродистого и хлористого бария (П. и М.Кюри, 1899).

Развитие учения о радиоактивности привело к многочисленным применениям ионизирующих излучений в науке, технике, сельском хозяйстве, геологии и медицине. Достаточно упомянуть метод меченых атомов (1915, Г.Хевеши и Ф.Панет), гамма-резонансную спектроскопию(1958, Р.Мессбауэр), радиоуглеродный метод геохронологии - «атомные часы» (1946, У.Либби), нейтронный каротаж скважин (1941, Б.М.Понтекорво) и др..

В несколько сокращённом виде, хронология развития учения о радиоактивности выглядит следующим образом.

1901 Введение понятия радиоактивности (М.Кюри).

1902 Механизм радиоактивного процесса как явления самопроизвольного распада химических элементов (Э.Резерфорд, Ф.Содди). Доказательство, что торон – инертный газ (Э.Резерфорд, Ф.Содди).

1903 Образование гелия при α-распаде (В.Рамзай и Ф.Содди). Измерение коэффициента диффузии эманации радия в воздухе (П.Кюри, Ж.Данн). Идея радиоактивных рядов – продуктов распада урана и тория (Э.Резерфорд, Ф.Содди).

1905 Статистический характер радиоактивных превращений (Э. Швейдлер). Открытие радиотория (^{228}Th) (О.Хан).

1906 β-активность калия и рубидия (Н.Кэмпбелл, А.Вуд). Открытие характеристического рентгеновского излучения (Ч. Варила). Обнаружение рассеяния альфа-частиц (Э.Резерфорд)

1908 Изучение рассеяния альфа частиц на тонких фольгах (Г.Гейгер). Характеристическое рентгеновское излучение, как фундаментальное свойство атома (Ч.Баркла, Ч.Сандлер). Прибор для регистрации отдельных заряженных частиц (счетчик Г.Гейгера – В. Мюллера).

1909 Доказательство, что различные изотопы свинца являются конечным продуктом трех естественных радиоактивных семейств (Дж. Грэй). Доказательство, что альфа-частицы являются дважды ионизированными атомами гелия (Э.Резерфорд, Т.Ройдс).
1910 Измерение заряда электрона (Р.Милликен). Получение чистого металлического радия (М.Кюри, А.Дебьерн). Первое определение энергии бета-частиц по их отклонению в магнитном поле (О.Байер, О.Хан).
1911 Открытие атомного ядра, создание планетарной модели строения атома; теория рассеяния альфа-частиц в веществе (Э.Резерфорд). Постоянные распада α-излучателей связаны с длиной пробега α-частиц (Зависимость между временем жизни и энергией распада радиоактивных ядер - закон Г.Гейгера - Дж.Нэтолла). Изготовление первого международного радиевого эталона (М.Кюри, А.Дебьерн).
1912 Открытие изотопов: обнаружение существования атомов неона с массой 20 и 22 (Дж. Дж. Томсон). Открытие космических лучей (В.Гейс). Изобретение прибор для наблюдения следов заряженных частиц (камера Ч. Вильсона).
1913 Понятие изотопа и изотопия у радиоактивных элементов (Ф.Содди). Правило смещения при радиоактивном распаде, правило сдвига Содди – Фаянса (Ф.Содди, К.Фаянс независимо друг от друга, а так же А.С.Рассел). Разделение изотопов методом газовой диффузии (Ф. Астон).
1914 Разделение химически неделимых радиоэлементов с помощью метода диффузии (Г.Хевеши). Открытие непрерывного спектра энергии бета-излучения (Дж. Чэдвик). Доказательство идентичности рентгеновских спектров изотопов, окончательное подтверждение равенства порядковых номеров у изотопов данного элемента (Э.Резерфорд, Э.Андраде). Доказательство существования стабильных изотопов свинца (Ф.Содди и др.). Предсказание внутренней конверсии (Э.Резерфорд).
1915 Разработка метода меченых атомов (Д.Хевеши, Ф.Панет).
1917 Изотопы высшего порядка – ядерные изомеры (Ф.Содди).
1918 Искусственная трансмутация элементов (Э.Резерфорд). Доказательство существования изотопов среди продуктов радиоактивного распада (Дж.Дж.Томсон). Возможность существования ядерной изомерии (Ст. Мейер).
1919 Открытие протона; доказательство наличия в ядрах элементов протонов; осуществление первой искусственной реакции – превращение азота в кислород (Э.Резерфорд). Объяснение происхождения линейчатого спектра бета-излучения. Электромагнитный метод разделения изотопов (Ф.Астон).
1920 Явление изотопного обмена (Г.Хевеши).
1921 Открытие явления изомерии атомных ядер, на примере протактиния-234 (О.Ган). Получение первого советского радия (В.Г.Хлопин).
1923 Открытие явления рассеяния коротковолнового излучения на свободном или слабо связанном электроне (эффект А. Комптона); экспериментальное доказательство существования фотона, постулированного в 1905 А.Эйнштейном; теоретическая интерпретация этого явления (А.Комптон, П.Дебай). Применение метода меченых атомов к биологическим проблемам: исследование поглощения растениями свинца из раствора (Д.Хевеши).
1925 Открытие Оже-эффекта, названный его именем (эффект П.Оже). Фотография следа протона и расщепления ядра азота альфа-частицами, первое наблюдение ядер отдачи (П. Блэкетт).
1928 Разработка теории альфа-распада как туннельного процесса (Дж. Гамов, Э.Кондон, Р.Герни). Теоретическое открытие античастицы (позитрон); предсказание возможности рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар (П.Дирак, Р.Оппенгеймер).
1929 Создание квантовой теории эффекта Комптона; уравнение, описывающее рассеяние электронов в этом эффекте (уравнение О.Клейна – И.Нишины).
1930 Возникновение сильнопроникающего излучения при бомбардировке α-частицами бериллия (нейтроны, В.Боте, Г.Беккер). Гипотеза нейтрино (В.Паули). Открыт изотоп уран-238 (Ф.Астон).

1932 Открытие нейтрона и вычисление его массы (Дж.Чэдвиг). Открытие в космических лучах позитрона (К.Андерсон). Обнаружение протонов отдачи (И. и Ф.Жолио-Кюри). Осуществление первых ядерных превращений под действием нейтронов (Н.Фезер, Л.Мейтнер, У.Харкинс).
1933 Теория бета-распада с учетом нейтрино; введение нового типа взаимодействия - слабого (Э.Ферми). Образование электрон-позитронных пар из жесткого гамма-кванта (И. и Ф.Желио-Кюри К.Андерсон, П.Блэкетт, Дж.Оккиалини); механизм этого явления установил Р.Оппенгеймер. Открытие электронно-позитронных ливней в космических лучах (П.Блэкетт, Дж. Оккиалини). Предсказание внутренней конверсии с образованием электронно-позитронных пар (Р.Оппенгеймер). Экспериментальное доказательство аннигиляции электронов и позитронов, предсказанной П.Дираком
1934 Позитронный (β^+ - распад) (И. и Ф.Жолио-Кюри). Открытие искусственной радиоактивности (И. и Ф.Жолио-Кюри). Ядерная изомерия (Г.Гамов). Открытие внутренней конверсии гамма-лучей с образованием электронно-позитронных пар (А.И.Алиханов, А.И.Алиханьян, Н.С.Козодаев). Открытие свечения чистых прозрачных жидкостей под действием гамма-лучей (эффект С.И.Вавилова – П.А.Черенкова). Предсказание обратного бета-распада (Х.Бете, Р.Пайерлс).
1935 Радиоактивность калия связана с изотопом ^{40}К (Г.Хевеши). Захват орбитального электрона (Х.Юкава). Ядерная изомерия у естественных (О.Хан, 1921) и искусственных (И.В.Курчатов, 1935) изотопов. Открытие урана-235 (А.Демпстер). Предсказание двойного бета-распада и разработка его теории (М.Гепперт-Майер).
1936 Причина ядерной изомерии (Г.Ван-Вургис). Обобщение теории бета-распада - ввод взаимодействия Дж. Гамова – Э.Теллера. Идея, что обратный бета-распад является процессом, вызываемым свободным нейтрино (Х. Бете и Р.Бэчер). Объяснение существования метастабильных состояний ядер (К.Вейцзеккер). Предсказание К-захвата (Х. Юкава, С.Саката).
1937 Синтез первого искусственного элемента - технеция (К.Перрье, Э.Сегре). Открытие К-захвата (Л.Альварес). Разработка теории эффекта Вавилова – Черенкова (И.Е.Таммом, И.М.Франком).
1938 Конверсионное излучение ядерных изомеров (Л.Русинов, Б.Понтекорво). Вынужденное деление урана (О.Хан, Ф.Штрассман). Обнаружение испускания электронов внутренней конверсии веществами, захватывающими нейтроны (Дж. Гофман, Р.Бэчер).
1939 Распад урана на два осколка примерно равной массы; введение Л.Мейтнер понятия «деление ядра». (Л.Мейтнер, О.Фриш). L- захват (Б.Пунтекорво). Испускание запаздывающих нейтронов (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). Идею цепной ядерной реакции выдвинул в 1934 Сцилард. Открытие запаздывающих нейтронов (Р. Роберте, Р. Мейер, П.Ванг). Открытие испускания вторичных нейтронов при делении (Л.Сцилард, Э.Ферми, Г.Андерсон, В.Зинн, Ф.Жолио-Кюри, Х. Халбан, Л.Коварски). Экспериментальное доказательство деления ядра урана на два осколка и непосредственное измерение энергии деления (О.Фриш, Ф.Жолио-Кюри, Г.Андерсон, Дж. Даннинг).
1940 Синтез нептуния (Э.Макмиллан, П.Абельсон) и плутония (Г.Сиборг, А.Валь, Дж. Кеннеди, Э.Сегре). Спонтанное деление урана (К.А.Петржак, Г.Н.Флеров). Количественный анализ цепной реакции деления урана на медленных нейтронах и формулировка условий ядерного взрыва (Я.Б.Зельдович и Ю.Б.Харитон). Выделение чистого урана-235 (Дж. Даннинг, А.Нир). Доказательство, что уран-235 делится медленными нейтронами (Ю.Бут, Дж. Даннинг, А.Гросс). Возможность протекания в системе с ураном и тяжелой водой цепной ядерной реакции деления (Х. Халбан, Л.Коварски).
1942 Первый успешный косвенный опыт по доказательству существования нейтрино: регистрировались ядра отдачи, возникающие вследствие испускания нейтрино при захвате орбитальных электронов (Дж.Аллен).

1944 Предсказание синхротронного излучения (Д.Д.Иваненко, И.Я.Померанчук, открыто в 1946 Блюитом). Актинидная теория, играющая важную роль для систематики и предсказания свойств тяжелых трансурановых элементов (Г.Сиборг).
1946 Предсказание синхротронного излучения (Д.Д.Иваненко, И.Я.Померанчук, открыто в 1946 Блюитом). Синтез 95го и 96-го элементов – америция и кюрия (Г.Сиборг, Р.Джеймс, Л.Морган, А.Гиорсо). Актинидная теория, играющая важную роль для систематики и предсказания свойств тяжелых трансурановых элементов (Г.Сиборг). Измерение константы деления урана (Дж. Шарф-Гольдхабер, Дж. Клайбер).
1948 Экспериментальное обнаружение бета-распада нейтрона (А.Снелл и Л.Миллер).
1949 Зависимость скорости электронного захвата от химического состояния (Э.Сегре). Наблюдение L-захвата (Б.М.Понтекорво).
1951 Измерение периода полураспада нейтрона (Дж. Робсон). Предсказание протонной радиоактивности (Б.С.Джелепов).
1952 Эксперимент по регистрации ядер отдачи, возникающих при электронном захвате в аргоне (Дж. Родебак, Дж. Аллен); доказательство закона сохранения импульса при испускании нейтрино.
1957 Постулировано, что в бета-распаде не сохраняется не только пространственная четность (*P*-инвариантность), но и зарядовое сопряжение – *C*-инвариантность (Т.Ли, Ч.Янг, Р.Эме). Экспериментальное доказательство продольной поляризации β-частиц в бета-распаде; $\beta^{\pm}$-частицам соответствует левый винт, β^{-}-частицам – правый.
1959 Точное определение периода полураспада свободного нейтрона, 11,7 мин (П.Е.Спивак).
1961 Явление спонтанного деления ядер, находящихся в изомерном состоянии (С.М.Пеликанов, В.А.Друин, В.А.Карнаухов). Экспериментально доказано существование двух типов нейтрино – электронного и мюонного (Л.Ледерман, М.Шварц, Дж. Штейнбергер). Экспериментально обнаружен бета-распад положительного пиона, величина вероятности которого подтвердила закон сохранения векторного тока, теоретически обоснованный в 1955 Я.Б.Зельдовичем (Ю.Д.Прокошкин). Экспериментально открыто явление испускания запаздывающих протонов (В.А. Карнаухов, Дж.Черны, 1970, 3. Хофман, 1982). Экспериментально установлено явление спонтанного деления атомных ядер, находящихся в нестабильном состоянии (Г.Н.Флеров, С.М.Поликанов).
1967 Обнаружение двойного бета-распада. Обнаружено двойное тормозное излучение.
1970 Открытие протонной радиоактивности (Дж. Черны).
1984 Открытие кластерного распада (испускание ^{14}C) (Х. Роуз, Г. Джонс; Д.В.Александров).

8. Радиохимия

История развития радиохимии тесно переплетена с историей радиоактивности.

В 1996 А.Беккерель открыл явление радиоактивности. Фотографическим методом сначала была обнаружена радиоактивность соли (сульфат уранил-калия, $UO_2SO_4*K_2SO_4*2H_20$), а вскоре – радиоактивность чистого урана. В 1898 ученица Беккереля М. Склодовская-Кюри и Г.Шмидт (не зависимо друг от друга) открыли, что торий тоже радиоактивен. В том же году она и ее муж, Пьер Кюри, с помощью электрометра установили, что радиоактивность урановых минералов больше, чем радиоактивность урана в них содержащегося. Это наблюдение привело супругов Кюри к предположению, что в урановых минералах находится какой-то значительно более радиоактивный элемент, чем уран. И действительно, переработав несколько тонн урановой руды, они получили два очень радиоактивных осадка: гидроокись висмута и сернокислый барий. Анализ осадков привел к выделению двух новых радиоактивных элементов: из первого осадка - *полония* (назван в честь родины Мари Кюри - Польши), а из второго (методом дробной кристаллизации) - *радия*. Вскоре было обнаружено, что соли и растворы радия выделяют тяжёлый радиоактивный газ - радон (Э.Резерфорд, в августе 1899 открыл изотоп ^{220}Rn – торон;

основной изотоп радона, радон-222, отрыт Дорном в 1900; актинон – ^{219}Rn - А.Дебьерном в 1910. В октябре 1899 был открыт актиний, а в 1903 - радиоторий (^{228}Th) (О.Хан).

В истории развития радиохимии можно выделить несколько этапов.

Первый этап (1898-1913) начат исследованиями М.Кюри и П.Кюри, вызвавшими большое число работ, посвященных открытию, изучению свойств, установлению местоположения в периодической системе и генетических связей естественных радиоактивных элементов и изотопов. В этот период было открыто около 40 естественных радиоактивных элементов и изотопов и 5 новых радиоактивных элементов (полоний, радий, радон, актиний, протактиний). Все вновь открытые радиоактивные элементы нашли место в периодической системе элементов и в радиоактивных семействах. Новые элементы были подробно исследованы с химической точки зрения. Удалось сформулировать правила превращения радиоактивных изотопов элементов одних элементов в другие.

Был предложен механизм радиоактивного процесса как явления самопроизвольного распада химических элементов (Э.Резерфорд, Ф.Содди, 1902), доказан статистический характер радиоактивных превращений (Э. Швейдлер, 1903). В 1903 Э.Резерфорд, Ф.Содди выдвинули идею радиоактивных рядов – продуктов распада урана и тория – генетически связанных радионуклидов. В 1906 Кэмбеллом открыта радиоактивность калия и рубидия. Химиками было доказано, что различные изотопы свинца являются конечным продуктом трех естественных радиоактивных семейств (Дж. Грэй, 1909), в цепочке превращений один из элементов – радиоактивный инертный газ – радон, а альфа-частицы представляют собой дважды ионизированные ионы гелия (Э.Резерфорд, Т.Ройдс, 1909). В 1912 произошло открытие изотопов - обнаружено существования атомов неона с массой 20 и 22 (Дж. Дж. Томсон),

Проводившиеся в период с 1905 по 1912 исследования продуктов распада урана, тория и актиния (RdTh, $MsTh_1$, $MsTh_2$, RaA, RaE, AcB и др.) привели в 1913 к обнаружению изотопов и явления изотопии у радиоактивных элементов (Ф.Содди). Окончательное доказательство существования изотопов среди продуктов радиоактивного распада дал Дж.Дж.Томсон в 1918. Большое значение имело установление правила смещения при радиоактивном распаде - правило сдвига Содди – Фаянса (Ф.Содди, К.Фаянс независимо друг от друга, а так же А.С.Рассел, 1913). Все обнаруженные и изученные в этот период радиоактивные вещества оказались изотопами таллия, свинца, висмута, полония, радия, актиния, тория, протактиния и урана. Были высказаны предположения о возможности существования изотопов высшего порядка – ядерные изомеров (Ф.Содди, 1917) и явления ядерной изомерии (Ст. Мейер, 1918). В 1921 О.Хан открыл явления изомерии атомных ядер, на примере протактиния-234. Были установлены закономерности изменения химической природы элементов в результате радиоактивного распада, опубликованы первые работы по влиянию температуры на эманирование твердых тел (А.С.Коловрат-Червинский, 1906), измерен коэффициент диффузии эманации радия в воздухе (П.Кюри, Ж.Данн, 1903). К этому периоду относится изготовление первого международного радиевого эталона (М.Кюри, А.Дебьерн) и начало работ по разделение изотопов (метод газовой диффузии (Ф. Астон, 1913)).

Термин «радиохимия» введен в науку в 1910 году А.Камероном в его книге «Радиохимия».

Началом второго этапа (1913-1934) можно считать исследования К.Фаянса и Ф.Панета, выполненные в 1913 г., и посвященные изучению общих закономерностей поведения ничтожно малых количеств естественных радиоактивных элементов и их изотопов в процессах соосаждения и адсорбции. В результате этих исследований были сформулированы правила соосаждения адсорбции Фаянса-Панета. и О.Хана, а также закон сокристаллизации В.Г.Хлопина (1924). Разработана термодинамическая теория изоморфной сокристаллизации и адсорбции радиоактивных нуклидов (А.П.Ратнер, 1933). В 1914 Г.Хевеши методом диффузии удалось разделить химически неделимых радиоэлементы. В 1915 Г.Хевеши и Ф.Панет разработали метод радиоактивных индикаторов (метод меченых атомов), с помощью которого были изучены

процессы самодиффузии и изотопного обмена в соединениях свинца. А в 1923 Д.Хевеши - применил метод меченых атомов к биологическим проблемам (он исследовал поглощение растениями свинца из раствора). В 1920 он же открыл - явление изотопного обмена (Г.Хевеши). На этом этапе развития радиохимии обнаружены явления коллоидообразования радиоактивных изотопов висмута и полония и были проведены первые работы по электрохимии радиоактивных элементов. О.Ханом и Ф.Штрассманом продолжалось подробное изучение процессов влияния термических воздействий на процессы выделения радона из твёрдых тел – процессов эманирования.

На развитие радиохимии в значительной мере стимулировалось потребностями ядерной физики. Создание разнообразных методов осуществления ядерных реакций потребовало привлечение радиохимиков и их специфических методик для выделения и химической идентификации продуктов ядерных реакций. Э.Резерфорд ещё в 1918 провёл первую трансмутацию элементов с помощью альфа-частиц (попутно открыв протон). Но число ядерных реакций с участием альфа-частиц ограничено. Более перспективным оказалось использование ускорителей заряженных частиц (в первую очередь - протонов). В 1930 состоялся пуск циклотрона (Э.Лоуренс, М.Ливингстон), в 1931 - электростатического ускорителя заряженных частиц (генератор Р.Ван де Граафа), 1932 - установки для искусственного ускорения протонов – каскадный генератор (ускоритель Дж. Кокрофта – Э.Уолтона). Первое расщепление ядра частицами, ускоренными в циклотроне (Э.Лоуренс, М.Ливингстон, М.Уайт) произошло в 1932.В том же году удалось осуществить первую ядерную реакцию с искусственно ускоренными протонами – трансмутация ядер лития (Дж. Кокрофт и Э.Уолтон). В том же году было достигнуто первое расщепление ядра частицами, ускоренными в циклотроне (Э.Лоуренс, М.Ливингстон, М.Уайт).

Начало третьего этапа развития радиохимии (с 1933) совпадает с открытием нейтрона (Чедвиг, 1932) и искусственной радиоактивности (И.Кюри и Ф.Жолио-Кюри, 1934 г.). В 1933 была продемонстрирована возможность получения мощных источников быстрых нейтронов при помощи ускорителей и открытие (d, n) и (p, n) реакций (Ч.Лауритсен). Одновременно был открыт ядерный фотоэффект – фоторасщепление дейтрона (Дж. Чэдвик, М.Гольдхабер) и расщепление бериллия гамма-квантами (Л.Сцилард, Т.Чалмерс). В 1935 Р.Оппенгеймер и М.Филлипс рассмотрели ядерную реакцию срыва, а П.Мун, Дж. Тильман доказали резонансный характер взаимодействия медленных нейтронов с ядрами.

В те же годы были созданы ускорители заряженных частиц: циклотроны, бетатроны, ускорители Ван-де-Граафа. Сообщая заряженным частицам энергию в десятки миллионов электрон-вольт, эти устройства позволили получить радиоактивные изотопы многих элементов середины Менделеевской системы. Возникла область радиохимии, направленная на химическое изучение ядерных реакций и выделение получаемых радиоактивных продуктов.

В этот период устанавливается возможность искусственного получения радиоактивных изотопов почти всех известных стабильных элементов, открываются ядерные реакции, имеющие исключительно важное значение для получения радиоактивных изотопов и синтеза новых элементов, в том числе и трансурановых. В 1937 К.Перрье, Э.Сегре осуществили синтез первого искусственного элемента – технеция (бомбардировкой ядер молибдена дейтронами), Э.Сегре получил астат (1940), М.Перей открыл франций (1939), в 1940 Э.Макмиллан, П.Абельсон синтезировали нептуний-239 (β-излучатель), а Г.Сиборг, Э.Макмиллан, А.Валь, Дж. Кеннеди, Э.Сегре плутоний (в том числе плутоний-239.) В 1947 в продуктах деления урана был обнаружен один новый элемент – прометий.

Начиная с 1932 ядерные реакции осуществляют в основном с помощью нейтронов. Особенно это направление усилилось после открытия Э.Ферми явления замедления нейтронов в веществе. В 1939 он обнаруживает странное поведение урана под действием тепловых нейтронов, которое объясняет тем, что возникающий радионуклид является трансурановым элементов. Радиохимики О.Ган и Ф.Штрассман повторили эксперименты Ферми с ураном. В

ходе облучения урана нейтронами они обнаружили радиоактивность, соосаждающуюся с солью бария. Возникло предположение, что в результате реакции урана с нейтроном выделилось две альфа-частицы и получился тяжёлый изотоп радия, который и выделялся с барием. Однако все попытки разделить дробной кристаллизацией бариевую соль и радиоактивность не дали результатов, в то время как эту радиоактивность удалось относительно легко отделить от одного из известных изотопов радия. Правильную интерпретацию этих опытов дали Л.Мейтнер и её племянник О.Фриш в 1939, заключив, что в результате ядерной реакции образуется радиоактивный изотоп бария. Возникла идея вынужденного под действием нейтронов деления урана на два осколка примерно равной массы. Л.Мейтнер ввела понятие «деление ядра». О.Фриш, Ф.Жолио-Кюри, Г.Андерсон и Дж. Даннинг получили надёжное экспериментальное доказательство деления ядра урана на два осколка и осуществли непосредственное измерение энергии деления. Открытие деления урана имело решающее значение для создания ядерного оружия и ядерной энергетики.

Весь 20-тый век радиохимики интенсивно исследовали свойства радиоактивных изотопов, в первую очередь элементов - не имеющих стабильных изотопов. Проводится идентификация элементов, вплоть до 114-го элемента (Г.Сиборг, А.Гиорсо, Г.Н.Флеров). При этом вводится актинидная теория Сиборга и проводится её экспериментальная проверка.

В 1934 Л.Сциллард и Т.Чалмерс обнаруживают своеобразные химические эффекты при процессах захвата атомными ядрами медленных нейтронов. В результате был создан метод ядер отдачи.

Одновременно были изучены химические последствия при изомерных переходах, β-распаде и К-захвате. Широкое развитие исследований в этой области привело к созданию новых направлений в радиохимии, например химии «горячих» и многократно ионизированных атомов, а также к созданию ядерной химии и химии процессов, индуцированных ядерными превращениями. Возникает ядерная индустрия, включающая в себя ядерное материаловедение.

Современное состояние радиохимии характеризуется развитием химии процессов деления и осколочных продуктов, а также химии и технологии ядерного горючего. Широкое развитие получают исследования ядерных превращений на частицах высокой энергии (реакции глубокого расщепления. Необычайно бурно развивается прикладная радиохимия, т.е. применение радиоактивных элементов во всех областях химических исследований. Некоторые из них: геохронология, определение возраста горных пород и датировка геологических событий, радиоуглеродный метод, метод радиоактивного диффузионного газового зонда, диффузионно-структурный анализ, мессбауэровские диамагнитные зонды, активационный анализ, химия позитрония и мюония. Радиохимия находит применение в экологии и медицине (новые методы переработки отходов (мембраны – полимерные и керамические), планарные адсорбенты и аппараты регулярной структуры, новые методы отверждения отходов, процессы диффузии радионуклидов, миграция радионуклидов в природных средах, состояние радионуклидов в воде, воздухе и почве, фармпрепараты, и др.

В настоящее время радиохимия занимается такими проблемами, как получение урана из очень разбавленных растворов (например, выделение его из морской воды), выделение трансплутониевых элементов в условиях высоких радиационных нагрузок, выделение ценных компонентов из отработанного топлива, глубокая очистка контурных вод энергетических ядерных установок и т.д. Решение этих задач связано с дальнейшим исследованием состояния и поведения радиоактивных нуклидов при процессах соосаждения, хроматографии, при электрохимических процессах. Чрезвычайно важные задачи ядерная технология ставит перед радиохимическим анализом (контроль чистоты ядерных материалов, определение степени выгорания, изотопного состава и содержания делящихся материалов в ядерном топливе и др. На современном этапе все более широкое развитие приобретает прикладная радиохимия.

Радиоактивные нуклиды и радиоактивные излучения находят применение в самых различных областях науки и народного хозяйства.

9. Ионизирующие излучения и их взаимодействие с веществом

В 1853 г. французский физик Антуан-Филибер Массон заметил, что высоковольтный разряд между электродами в стеклянной трубке, содержащей газ при очень низком давлении, порождает красноватое свечение (такие трубки явились первыми предшественниками современных неоновых трубок). Когда другие экспериментаторы принялись откачивать газ из трубки до большего разрежения, свечение начало распадаться на сложную последовательность отдельных светящихся слоев, цвет которых зависел от типа газа в трубке. Английский физик и химик Уильям Крукс с помощью усовершенствованного вакуумного насоса достиг довольно большого разрежения и обнаружил, что свечение исчезло, а стенки стеклянной трубки флуоресцируют зеленоватым светом. При этом оказалось, что лучи выходят из отрицательного электрода (помещенный внутрь трубки крестообразный предмет отбрасывал тень на противоположную стенку), и что лучи состоят из некоторой субстанции и несут отрицательный электрический заряд (ударяясь о лопасти легкого колесика, лучи приводили его во вращение, а пучок лучей отклонялся магнитом в сторону, соответствующую отрицательному заряду). В 1878 г. Крукс предложил гипотезу о том, что флуоресценцию вызывают лучи, ударяющиеся о стеклянные стенки. Так как отрицательный электрод называется катодом, испускаемое стенками излучение получило название катодных лучей. (У.Крукс в 1886 первым высказал мысль о неодинаковости атомов одного и того же элемента, т.е. предсказал явление изотопии).

Замечание. Интересно, что У.Крукс открыл таллий (1861) и гелий (1895, вместе с У.Рамзаем), а также обнаружил сцинтилляции и создал прибор для их наблюдения.

Немецкий физик Филипп фон Ленард показал, что катодные лучи могут проникать сквозь окошко в трубке, затянутое тонкой алюминиевой фольгой, и ионизовать воздух в непосредственной близости от окошка. Загадка разрешилась позднее, в 1897 г., когда английский физик Дж.Дж. Томсон установил природу частиц в катодных лучах. Он не только открыл электрон, но и измерил отношение e/m заряда электрона к массе.

В 1893 немецкий физиолог и физик Герман фон Гельмгольц предсказал, что излучение, подобное свету, но с достаточно короткой длиной волны, могло бы проникать в твердые материалы. В то время такое излучение не было известно. Немецкий физик Вильгельм-Конрад Рентген (ректор Вюрцбургского университета) в 1894 приступил к экспериментальным исследованиям электрического разряда в стеклянных вакуумных трубках. Сначала он повторил некоторые из более ранних экспериментов, в частности показав, что исходящие из окошка Ленарда катодные лучи (тогда еще неизвестные) вызывают флуоресценцию экрана, покрытого цианоплатинитом бария. Однажды (8.11.1895) Рентген, чтобы облегчить наблюдения, затемнил комнату и обернул трубку Крукса (без окошка Ленарда) плотной непрозрачной черной бумагой. К своему удивлению, он увидел на стоявшем неподалеку экране, покрытом платиносинеродистым барием, полосу флуоресценции. Флуоресценция появлялась всякий раз, когда он включал трубку, так что источником излучения являлась именно трубка, а не какая-нибудь другая часть цепи. Экран флуоресцировал на расстоянии двух метров от трубки, что намного превосходило возможности короткодействующих катодных лучей. Следующие семь недель он провел, исследуя явление, которое он назвал икс-лучами (т.е. неизвестными лучами). Тень, которую отбрасывал на флуоресцирующий экран проводник от индукционной катушки, создававшей необходимое для разряда высокое напряжение, навела Рентгена на мысль об исследовании проникающей способности Х-лучей в различных материалах. Он обнаружил, что Х-лучи могут проникать почти во все предметы на различную глубину, зависящую от толщины предмета и плотности вещества. Держа небольшой свинцовый диск между разрядной трубкой и экраном, Рентген заметил, что свинец непроницаем для икс-лучей, и тут сделал поразительное открытие: кости его руки отбрасывали на экран более темную тень, окруженную более светлой тенью от мягких тканей. Вскоре он обнаружил, что икс-лучи вызывают не только свечение экрана, покрытого платиносинеродистым барием, но и потемнение фотопластинок (после проявления) в тех местах, где икс-лучи попадают на фотоэмульсию. Так Рентген стал первым в

мире радиологом. В честь него икс-лучи стали называть рентгеновскими лучами. Широкую известность приобрела выполненная Рентгеном в рентгеновских лучах фотография (рентгенограмма) кисти жены. На ней, как на негативе, отчетливо видны кости (белые, так как более плотная костная ткань задерживает икс-лучи, не давая им попасть на фотопластинку) на фоне более темного изображения мягких тканей (задерживающих икс-лучи в меньшей степени) и белые полоски от колец на пальцах. Медики сразу осознали значение рентгеновского излучения для диагностики. Рентген стал первым (1901 г.) лауреатом Нобелевской премии по физике.

Немецкий физик Макс фон Лауэ высказал предположение, что коротковолновый характер рентгеновского излучения можно было бы доказать, используя в качестве дифракционной решетки регулярно расположенные атомы в кристалле. Дифракционная решетка состоит из серии штрихов, проведенных на одинаковом (малом) расстоянии друг от друга на поверхности стеклянной или металлической пластинки. При рассеянии света на таких пластинках возникает сложный узор из светлых и темных пятен, вид которого зависит от длины волны падающего на решетку света. Но оптические дифракционные решетки были слишком грубы для того, чтобы на них могла происходить дифракция излучения со столь короткими длинами волн, как те, которые ожидались в случае рентгеновского излучения. В 1913 г. эксперимент, предложенный фон Лауэ, был поставлен Вальтером Фридрихом и Паулем Книппингом. Была открыта интерференция рентгеновских лучей в кристаллах, что подтвердило волновую природу рентгеновского излучения. На базе этого открытия впоследствии был создан рентгеноструктурный анализ твердых тел.

В 1895 французский физик А. Беккерель открыл, что чистый уран и его соли испускают ионизирующее излучение. В 1898-1900 Э.Резерфорд, М. и П.Кюри и П. Виллар определили состав радиоактивных лучей, доказав существование альфа- и бета-лучей. В 1900 П.Вийяр идентифицировал гамма-лучи. В 1903 В.Рамзай и Ф.Содди обнаружили образование гелия при α-распаде.

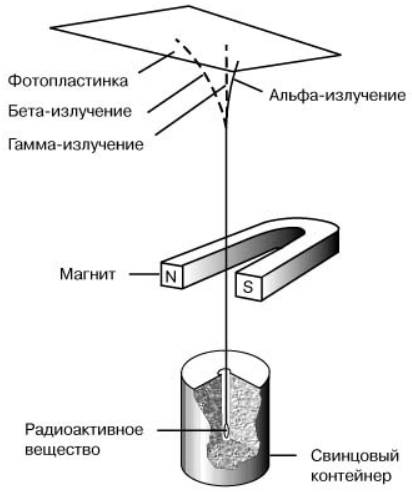


Рис.4. Схема эксперимента, иллюстрирующего отклонение разных видов радиоактивного излучения в магнитном поле.

Приведём дальнейшие этапы развития представлений об ионизирующем излучении.

1906 Открытие характеристического рентгеновского излучения (Ч. Варила).

1907 Первое определение длины волны рентгеновских лучей (В.Вин).

1908 Изучение рассеяния альфа частиц на тонких фольгах (Г.Гейгер). Характеристическое рентгеновское излучение, как фундаментальное свойство атома (Ч.Баркла, Ч.Сандлер).

1909 Доказательство, что альфа-частицы являются дважды ионизированными атомами гелия (Э.Резерфорд, Т.Ройдс).

1910 Измерение заряда электрона (Р.Милликен). Первое определение энергии бета-частиц по их отклонению в магнитном поле (О.Байер, О.Хан).

1911 Теория рассеяния альфа-частиц в веществе (Э.Резерфорд). Постоянные распада α-излучателей связаны с длиной пробега α-частиц (Зависимость между временем жизни и энергией распада радиоактивных ядер - закон Г.Гейгера - Дж.Нэтолла). Вывод формулы для эффективного поперечного сечения рассеяния нерелятивистских заряженных точечных частиц, взаимодействующих по закону Кулона (формула Э.Резерфорда).

1912 Дифракция рентгеновских лучей на кристалле сульфида цинка (М.Лауэ). Формулировка условия дифракции падающего на кристалл монохроматического потока рентгеновских лучей

(формула Л.Брэгга - Ю.В.Вульфа). Открытие явления дифракции (интерференции) рентгеновских лучей при прохождении их через кристаллы (М.Лауэ). Разработка теория интерференции рентгеновских лучей на кристаллах и использование их в качестве дифракционной решетки для рентгеновских лучей (М.Лауэ). Экспериментальное доказательство периодичности атомной структуры кристаллов, существования кристаллической решетки (Г. и Л.Брэгги).

1913 Закон Мозли: длина волны рентгеновского характеристического излучения элемента определяется зарядом его ядра; зависимость квадратного корня из частоты характеристического излучения от порядкового номера элементов (Г.Мозли). Рентгеновский спектрометр (Г.Брэгг). Положено начало рентгеноструктурному анализу (Г. и Л.Брэгги, Ю.В.Вульф) и рентгеновской спектроскопии. Разработана теория дифракции рентгеновских лучей (Ч.Г.Дарвин). Предсказание диффузионного рассеяния рентгеновских лучей колебаниями кристаллической решетки (П.Дебаи, Л. Бриллюэн).

1914 Объяснение возникновения рентгеновских спектров излучения, исходя из представлений об электронных оболочках атома, которые создают вокруг ядра последовательные слои (В.Коссель). Открытие непрерывного спектра энергии бета-излучения (Дж. Чэдвик). Доказательство идентичности рентгеновских спектров изотопов, окончательное подтверждение равенства порядковых номеров у изотопов данного элемента (Э.Резерфорд, Э.Андраде). Дифракция гамма-лучей на кристалле, доказательство их электромагнитной природы (Э.Резерфорд, Э.Андраде).

1915 Установлен коротковолновый предел непрерывного спектра рентгеновских лучей.

1916 Метод исследования структуры поликристаллических материалов при помощи дифракции рентгеновских лучей (метод П.Дебая – П.Шеррера). Построение динамической теории рассеяния рентгеновских лучей (П.Эвальд).

1917 Первая удачная рентгеноспектрограмма (Э.Вагнер).

1919 Сателлиты в рентгеновских спектрах (М.Сигбаи). Объяснение происхождения линейчатого, спектра бета-излучения.

1922 Согласование корпускулярных и волновых свойств излучений в рамках единой теории – корпускулярно-волновой дуализм, идея дифракции электрона (Л. Де Бройль). Разработка систематики сложных спектров (А.Ланде, Ф.Хундом, Г.Рассел).

1923 Идея о волновых свойствах материи (волны де Бройля). Эта идея Л. де Бройля о всеобщности корпускулярно-волнового дуализма легла в основу квантовой механики Шредингера. Открытие явления рассеяния коротковолнового излучения на свободном или слабо связанном электроне (эффект А. Комптона); экспериментальное доказательство существования фотона, постулированного в 1905 А.Эйнштейном; теоретическая интерпретация этого явления (А.Комптон, П.Дебай). Камера Вильсона помещена в сильное магнитное поле: наблюдение искривления треков альфа-частиц (П.Л.Капица, Д.В.Скобельцын).

1925 Идея использования кристалла для наблюдения дифракции электронов и доказательства их волновой природы (В.М.Эльзассер). Доказательство справедливости законов сохранения энергии и импульса при рассеянии гамма-квантов на электронах для каждого элементарного акта рассеяния (В.Боте, Г.Гейгер).

1927 Доказательство справедливости законов сохранения энергии и импульса при рассеянии гамма-квантов на электронах для каждого элементарного акта рассеяния (В.Боте, Г.Гейгер).

1929 Открытие дифракции атомов и молекул (О.Штерн). Создание квантовой теории эффекта Комптона; уравнение, описывающее рассеяние электронов в этом эффекте (уравнение О.Клейна – И.Нишины).

1930 Возникновение сильнопроникающего излучения при бомбардировке α-частицами бериллия (нейтроны, В.Боте, Г.Беккер).

1931 Обнаружение протонов отдачи (И. и Ф.Жолио-Кюри).

1933 Образование электрон-позитронных пар из жесткого гамма-кванта (И. и Ф.Желио-Кюри К.Андерсон, П.Блэкетт, Дж.Оккиалини); механизм этого явления установил Р.Оппенгеймер.

- Открытие электронно-позитронных ливней в космических лучах (П.Блэкетт, Дж. Оккиалини).

1934 Предсказание существования комптоновских процессов более высоких порядков, в которых в одном элементарном акте создаются два или более рассеянных квантов (В.Гайтлер, Л.Нордгейм). Открытие внутренней конверсии гамма-лучей с образованием электронно-позитронных пар (А.И.Алиханов, А.И.Алиханьян, Н.С.Козодаев). Открытие свечения чистых прозрачных жидкостей под действием гамма-лучей (эффект С.И.Вавилова – П.А.Черенкова). Разработка теории радиационных потерь электрона при движении в веществе (Х.Бете, В.Гайтлер).
1936 Открытие дифракции нейтронов (Д.Митчелл, Х. Халбан, П.Прейсверк). Поляризация нейтронов при прохождении через намагниченное железо (эффект Ф.Блоха). Первые измерения сечения захвата нейтронов протонами (Э.Ферми, Э.Амальди).
1937 Разработка теории эффекта Вавилова – Черенкова (И.Е.Таммом, И.М.Франком).
1942 Метод восстановления кристаллической структуры по ее дифракционной картине; идея рентгеновского микроскопа (Л.Брэгг).
1944 - Предсказание синхротронного излучения (Д.Д.Иваненко, И.Я.Померанчук, открыто в 1946 Блюитом).
1945 Основы нейтронографии (Э.Ферми).
1948 Первое наблюдение когерентного рассеяния нейтронов (К.Шулл).
1949 Графический метод представления амплитуд рассеяния частиц (диаграммы Р.Фейнмана).
1950 - Первое наблюдение индуцированного излучения (Э.Парселл и Р.Паунд)
1952 - Открытие излучения нейтронов и жестких гамма-лучей во время мощных импульсных разрядов в газах (Л.А.Арцимович, М.А.Леонтович).
1954 - Создана рентгеноэлектронная спектроскопия (К.Зигбан).
1963 Обнаружен «эффект теней» (А.Ф.Туликов).

10. Методы измерений

В сфере создания фундаментальных основ ядерной индустрии 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 авторадиографии. Сначала использовалась тонкослойная авторадиография для контроля за распределением радиоактивного вещества по поверхности образца. В 1925 разработан метод толстослойных ядерных фотоэмульсий (трековая авторадиография, 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. Блэкетт, 1925). В 1946 Созданы ядерные фотоэмульсии высокой чувствительности (С.Пауэлл). В 1948- изобретена нейтронная радиография (Х.Кальман).

М. и П.Кюри следили за радиоактивностью с помощью электроскопов (прибор для обнаружения и измерения электрического заряда), т.е. использовали эффект ионизации воздуха ионизирующем 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, 1908). Гейгеровский 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). 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). 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. В 1939 в технику измерений внедрён сцинтилляционный счетчик (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 $^{37}C + \nu \rightarrow {}^{37}Ar + e^{-}$.
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. Чэдвик, 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.Ланжевен 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).

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.

11. Ускорители

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 а 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 вещесьтвом. В настоящее время ускорители широко используются в ядерной физике и физике элементарных частиц и физике твёрдого тела, а также в дефектоскопии и лучевой терапии.

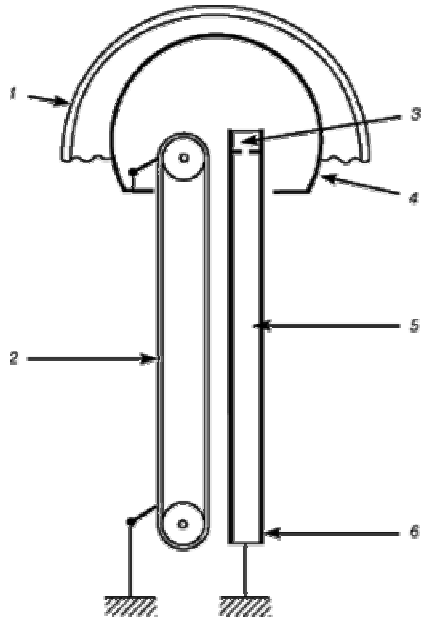


Рис.5. Генератор Ван-де-Граафа можно превратить в ускоритель, добавив вакуумную трубку. Заряженные частицы из источника, находящегося внутри сферического высоковольтного электрода, вводятся в трубку и ускоряются в направлении мишени. *1* – кожух; *2* – резиновая лента; *3* – источник частиц; *4* – высоковольтный электрод; *5* – вакуумная трубка; *6* – мишень.

Первым ускорителем электронов в сущности была трубка Крукса. Но реальностью ускорители стали только в конце 20-х годов. На первом этапе основной вклад в создание ускорителей внесли Р. Ван де Граф, Дж.Кокрофт и Э.Лоуренс.

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

1925 - Ядерные реакции под действием ускоренных протонов (Дж.Кокрофт Э.Уолтон).

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

1930 - - Пуск циклотрона (Э.Лоуренс, М.Ливингстон).

1931 - Создание электростатического ускорителя заряженных частиц (генератор Р.Ван де Граафа).

1932 - Осуществление первой ядерной реакции с искусственно ускоренными протонами – трансмутация ядер лития (Дж. Кокрофт и Э.Уолтон).

1932 - Пуск установки для искусственного ускорения протонов – каскадный генератор (ускоритель Дж. Кокрофта – Э.Уолтона).

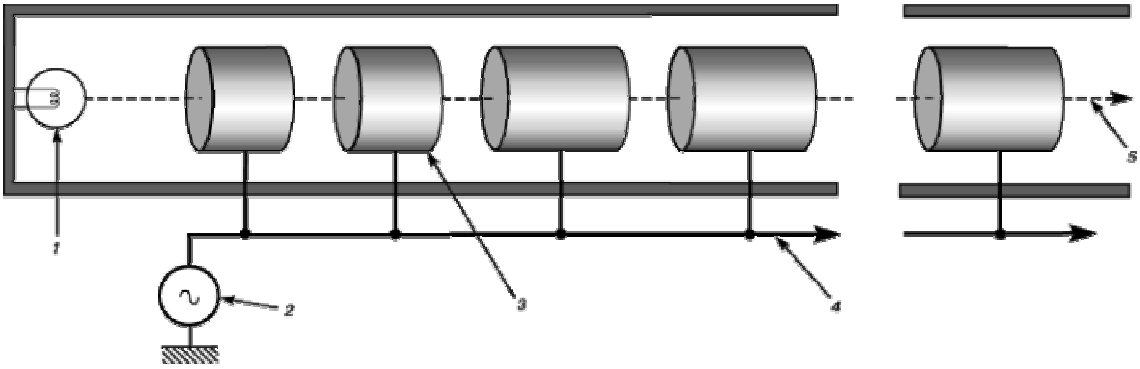


Рис.5. Линейный ускоритель. Частицы ускоряются в промежутках между дрейфовыми трубками. Внутри дрейфовых трубок они движутся с постоянной скоростью. Длина каждой трубки немного больше, чем предыдущей, и изменяется в пределах от 10 до 20 см, достигая постоянного значения в конце ускорителя, где скорость частиц становится близкой к скорости света. *1* – источник ионов (инжектор); *2* – ускоряющее напряжение; *3* – дрейфовая трубка; *4* – длинная линия; *5* – пучок.

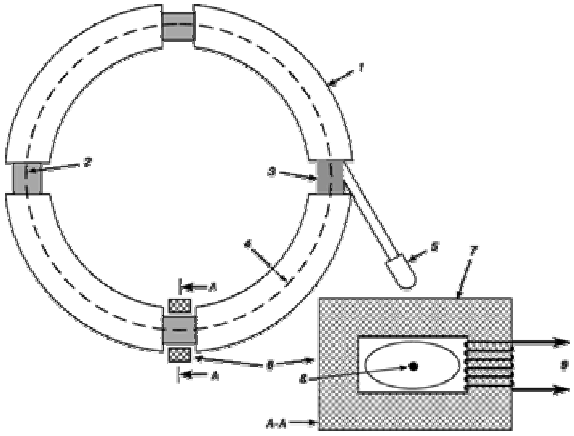


Рис.6. Космотрон в Брукхевене. Ускорял протоны до энергии 3 ГэВ. *Внизу* – поперечное сечение ускоряющей системы. *1* – 90°-й магнит; *2* – мишень; *3* – прямолинейный участок; *4* – равновесная орбита; *5* – инжектор; *6* – ускоряющая система; *7* – ферритовый сердечник; *8* – пучок частиц; *9* – ускоряющее напряжение.

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 ускорителя, основанного на принципе автофазировки (Говард, Барнес). Р.Вильсон предложил использование в лучевой терапии тяжелых заряженных частиц, в частности протонов (Беркли впервые применено облучение пациента протонами, 1954).

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

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

1954 - Пуск протонного синхрофазотрона на 6 млрд. эВ В (Беркли, США).

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

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

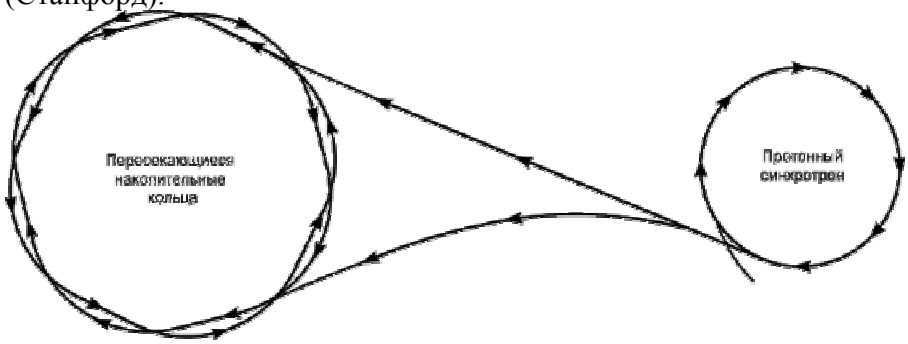
1958 - Пуск протонного синхрофазотрона с жесткой фокусировкой на 28 млрд. эв (ЦЕРН).

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).



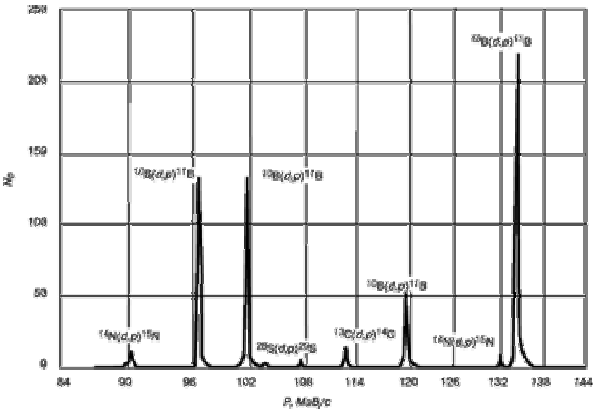


Рис.7. Пересекающиеся накопительные кольца. В лобовых столкновениях встречных пучков более полно используется энергия ускоренных частиц.

Рис.8. Спектр протонов, возникающих в реакции $^{10}B(d,p)^{11}B$. Величина N_P – число протонов, P – импульс протона. Слабые пики отвечают примесям азота, кремния и углерода

1967 - Пуск протонного синхрофазотрона с жесткой фокусировкой на 76 млрд. эв (г. Серпухов).

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).

12. Ядерные реакции

Первую искусственную трансмутацию элементов осуществил в 1918-19 Э.Резерфорд. Им был открыт протон и осуществлена первая искусственная реакция – превращение азота в кислород при облучении азота альфа-частицами. Значительный вклад открытие новых ядерных процессов внесли супруги И. и Ф. Жолио Кюри, Э.Ферми, О.Ган, Л.Мейтнер и др. Ядерные реакции обеспечивают превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами, гамма-квантами или друг с другом. Для ядерной индустрии особенно важными являются цепные ядерные реакции.

1932 - Открытие нейтрона и вычисление его массы (Дж.Чэдвиг).

1933 - Схема образования нейтрона при облучении бериллия α-частицами (И. и Ф. Жолио-Кюри).

1934 - Открытие искусственной радиоактивности (И. и Ф.Жолио-Кюри).

1934 - Ядерные реакции под действием нейтрона; открытие явления замедления нейтронов в веществе. (Э.Ферми).

1934 - Ферми открыл (с сотрудниками) искусственную радиоактивность, вызванную нейтронами, замедление нейтронов в веществе (1934).

13. Ядерные реакторы

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.

К таким открытиям следует отнести:

1) Изотопы урана: ^{238}U (1930, Ф.Астон) и ^{235}U (1935, А.Демпстер) и ^{233}U (1941, Г.Сиборг).

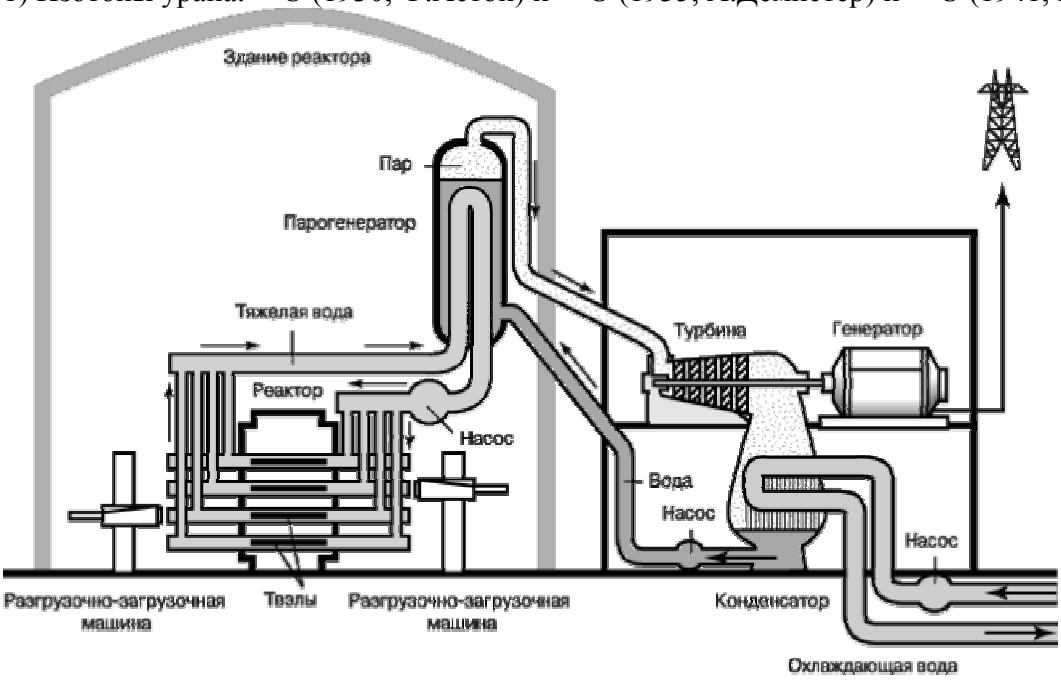


Рис.9. Канадский реактор CANDU на тяжелой воде. Тяжелая вода служит теплоносителем, охлаждающим реактор и создающим пар, который вращает турбину.

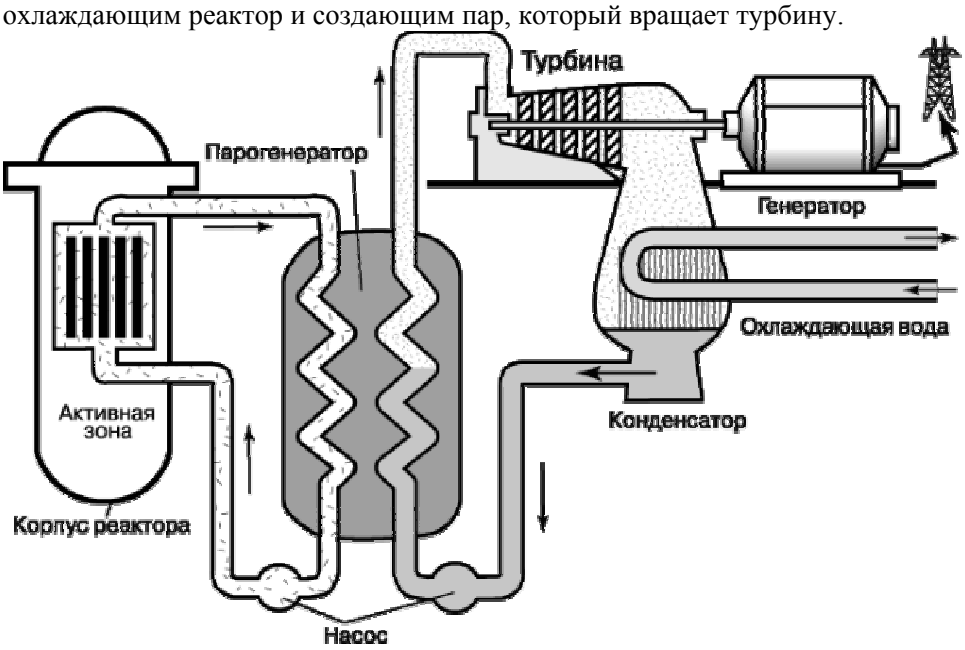


Рис.10. Реактор с водой под давлением. Нагретая вода подается насосом в парогенератор, где теплота передается во вторичный контур, в котором образуется пар, приводящий в действие турбину.

1941 -- Введение единицы ядерного сечения – барн.

2) Выделение чистого урана-235 (Дж. Даннинг, А.Нир).

3) Вынужденное (пороговое) деление урана ^{238}U под действием нейтронов (1938, О.Хан, Ф.Штрассман)

4) Вынужденное (беспороговое) деление урана ^{235}U медленными нейтронами (1940, Ю.Бут, Дж. Даннинг, А.Гросс).

5) Спонтанное деление урана (1940, К.А.Петржак, Г.Н.Флеров).

6) Деление тория-232 быстрыми нейтронами (И.Нишина).

7) Испускание запаздывающих нейтронов (1939, Р.Робертс).

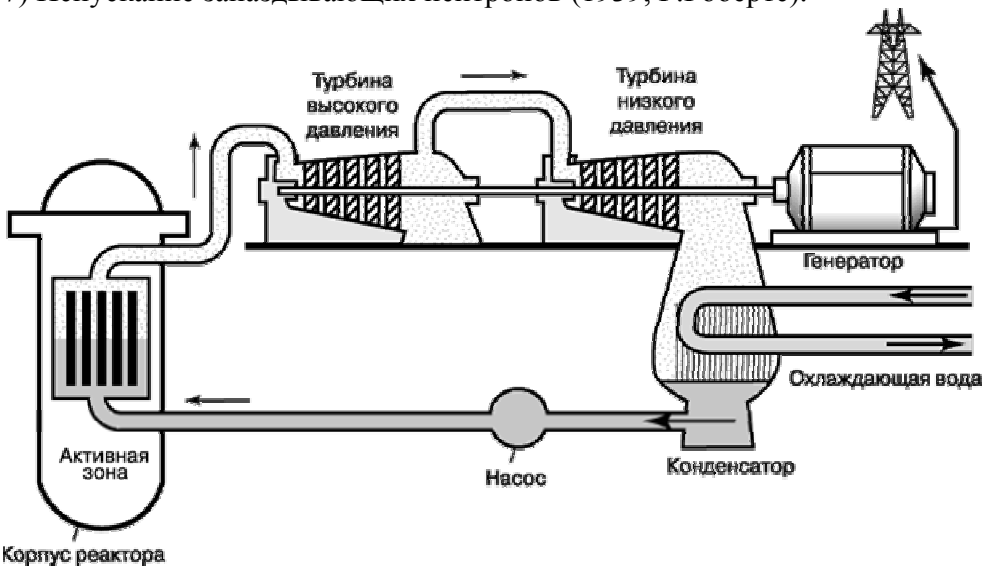


Рис.11. Кипящий реактор. Кипение воды происходит в активной зоне реактора. Образующийся пар приводит в действие турбогенератор.

8) Испускание вторичных нейтронов при делении (1939, Л.Сцилард, Э.Ферми, Г.Андерсон, В.Зинн, Ф.Жолио-Кюри, Х. Халбан, Л.Коварски).
9) 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). Идею цепной ядерной реакции выдвинул в 1934 Сцилард.
10) Выделение дейтерия (1932, Г.Юри) и получение тяжёлой воды (1933, Г.Льюис, Р.Магдональд),
11) Идея использования графита как замедлителя нейтронов (1939, Дж. Пеграм, Л.Сцилард, Э.Ферми, Г.Плачек).
12) Идея использования тяжелой воды как замедлителя нейтронов (1940, Х. Халбан, Л.Коварски).

Эти открытия позволили построить первую экспериментальную систему (реактор) с уран-графитовой решеткой (1941, Э.Ферми) и осуществить управляемую цепную реакцию деления ядер урана (1942, Э.Ферми, Г.Андерсон, В.Зинн). В 1944 осуществлён пуск первого ядерного реактора на природном уране с тяжелой водой в качестве замедлителя (Аргоннская национальная лаборатория). Осуществить цепную ядерную реакцию в первом советском ядерном реакторе в удалось в 1945 (И.В.Курчатов). Первый английский ядерный реактор сооружён в 1947, а 1948 - а французский ядерный реактор 20Е – 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 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 электрической энергии на АЭС и в ядерных силовых установках атомных судов, научных исследований, воспроизводства ядерного топлива и т.п.

14. Развитие Периодической системы элементов

Развитие Периодической системы элементов в первую очередь связано с открытием и синтезом новых элементов.
1898 - Открытие полония и радия (М.Склодовская-Кюри и П.Кюри).

1899 -Открытие актиния (Дебьерн).
1900 – Открытие радона-220 (торона) (Э.Резерфорд)
1900 – Открытие радона-222 (Дорн)
1902 - Доказательство, что торон – инертный газ (Э.Резерфорд, Ф.Содди).
1903 –Открытие радона-219 (актинона) (Дебьерн)
1903 - Образование гелия при α-распаде (В.Рамзай и Ф.Содди).
1905 - Открытие радиотория (^{228}Th) (О.Хан).
1906 - Открытие 71-го элемента – лютеция (Д.Урбен).
1917 - Открытие 91-й элемента – протактиния (О.Ган, Л.Мейтнер).
1923 - Открытие рентгеноскопическим методом 72-й элемента – гафния (Д.Хевеши, Д.Костер).
1925 - Открытие 75-го элемента – рения (супруги Ноддак).
1937 - Синтез первого искусственного элемента - технеция (К.Перрье, Э.Сегре).
1939 - Открытие франция (М.Перей).
1940 - Синтез нептуния (Э.Макмиллан, П.Абельсон) и плутония (Г.Сиборг, А.Валь, Дж. Кеннеди, Э.Сегре).
1940 - Открытие 85-й элемента – астата (Э.Сегре, Д.Корсон, К.Маккензи).
1944 - Синтез 95го и 96-го элементов – америция и кюрия (Г.Сиборг, Р.Джеймс, Л.Морган, А.Гиорсо).
1945 - Открытие 61-го элемента - прометия (Дж.Маринский).
1948 - Синтез 97-го элемента – берклия (Г.Сиборг, С.Томпсон, А.Гиорсо, К.Стрит-младший).
1949 - - Синтез 98-го элемента- калифорния (С.Томсон, Г.Сиборг, А.Гиорсо, К.Стрит-младший).
1952 - Идентифицирование 99-го элемента – эйнштейния – из осколков, образовавшихся в первом термоядерном взрыве (Г.Сиборг, А.Гиорсо, С.Томпсон).
1955 - Синтез 101-го элемента - менделевия (А.Гиорсо, Г.Сиборг, Б.Гарвей, Г.Чопин, С.Томпсон).
1955- Синтез элементов 100 – 114 с использованием пучков ускоренных ионов (Г.Сиборг, А.Гиорсо, Г.Н.Флеров, 1955 – 1995).

На развитие Периодической системы элементов определённое влияние оказало открытие изотопов и изобаров. В 1912 произошло открытие изотопов: обнаружение существования атомов неона с массой 20 и 22 (Дж. Дж. Томсон), а в 1913 введено понятие изотопа и изотопия у радиоактивных элементов (Ф.Содди). В 1914 получено доказательство идентичности рентгеновских спектров изотопов, окончательное подтверждение равенства порядковых номеров у изотопов данного элемента (Э.Резерфорд, Э.Андраде). И, наконец, в 1916 определено понятие химического элемента (Ф.Панет). В результате удалось найти объяснение объяснение отличия массы водорода от целого числа (1919, Ф.Астон). Важное значения для развития идей изотопии явилось открытие тяжелых изотопов кислорода (1929, У.Джиок) и водорода (1932, Г.Юри), а также синтез расщепляющегося изотопа плутония-239; доказательство, что он делится медленными нейтронами (1941, Г.Сиборг, Э.Макмиллан).

На развитие Периодической системы как таковой существенное влияние оказали следующие открытия:
1913 - Порядковый номер элемента в Периодической Системе равен заряду ядра его атомов (Ван-ден-Брук).
1913 - Закон Мозли: длина волны рентгеновского характеристического излучения элемента определяется зарядом его ядра; зависимость квадратного корня из частоты характеристического излучения от порядкового номера элементов (Г.Мозли).
1914 - Свойства элементов суть периодической функции зарядов ядер их атомов (Н.Бор, Г.Мозли).
1918 - Открытие изобар (Стюарт).
1921 - - Строение атомов – связь периодичности их химических и спектральных свойств с характером формирования электронных конфигураций по мере роста заряда ядра (Н.Бор).

1923 - Представление об оболочечной структуре атома, основанное на классификации электронных орбит по главному и азимутальному квантовым числам (Н.Бор).
1923 - Разработка теории периодической системы химических элементов Н.Бор.
1945 - Теория синтеза химических элементов; теория «горячей Вселенной» (Дж, Гамов).

Важную роль для систематики и предсказания свойств тяжелых трансурановых элементов сыграла актинидная теория (1944, Г.Сиборг), согласно которой число актинидов равно числу лантанидов. Эта теория в настоящее время подвергается серьёзной экспериментальной проверке. Выдвинутое в 1971 предположение о существовании «островков стабильности» в приложении к трансфермиевым элементам (Г.Сиборг) стимулировало поиск новых сверхтяжёлых элементов, продолжающийся до сих пор.

15. Разделение изотопов

Разработка методов разделения изотопов была начата одновременно с открытием изотопов. Ещё в 1913 Дж.Дж.Томсоном был применён электромагнитный метод разделения изотопов неона ^{20}Ne и ^{22}Ne, явившийся также способом их открытия. Будучи усовершенствованным, этот метод был использован в дальнейшем Ф.Астном для открытия и разделения изотопов многих элементов. В 1913 осуществлено разделение изотопов методом газовой диффузии (Ф. Астон), а в 1914 - разделение химически неделимых радиоэлементов с помощью метода диффузии (Г.Хевеши). В 1919 Ф.Линдеманном и Ф.Астоном был предложен для разделения изотопов метод центрифугирования. Этот метод стал перспективным после изобретения и изготовления в 1923 первой ультрацентрифуги (Т.Светберг). В 1932 Г.Герц использовал для разделения изотопов метод диффузии через пористые перегородки, а в 1934 – метод диффузии в струю пара. Метод ректификации изотопных смесей был применён в 1931 В.Керзоном и Г.Ван-Дейком для разделения ^{20}Ne и ^{22}Ne, а Г.Юри, Ф.Брикведом и Л.Мэрфи – для концентрирования дейтерия в жидком дейтерии. В 1933 Г.Люис и Р.Макдональд получили тяжёлую воду электролизом (кинетический метод). В 1935 Г.Юри и Л.Грейфф был предложен метод химического обмена, а в 1938 К.Клузиусом и Г.Диккелем - термодиффузионный метод.

16. Космические лучи

В анализе истории создания фундаментальных основ ядерной индустрии нельзя обойтись без хотя бы кратного рассмотрения работ по изучению космических лучей, поскольку как на первом этапе развития естественных наук, так и сейчас информация о процессах взаимодействия частиц высоких энергий возможно может быть получена лишь из анализа космических излучений. Именно на этом направлении были открыты позитрон, нейтрино, мезоны и т.п., изучены процессы образования пар и других компонентов материи и антиматерии, обнаружены ядра тяжёлых элементов. Благодаря этим исследованиям заложить надёжные теоретические основы ядерной индустрии.
1912 -Открытие космических лучей (В.Гейс)
1929 - Метод совпадений применён для исследования космических лучей (опыты В.Боте – В.Кольхерстера); обнаружение, что первичное космическое излучение состоит из заряженных частиц.
1932 - Открытие в космических лучах позитрона (К.Андерсон).
1933 - Открытие космических ливней (Б.Росси).
1936 - Первое применение фотопластинок для исследования космических лучей (М.Блау).
1937 - Открытие в космических лучах частиц с массой в 207 электронных масс - мюонов **(**μ-мезонов**)**
1937 - Первое наблюдение «звезд» в космических лучах (М.Блау, Г.Вамбахер).
1937 - Разработка основ каскадной теории развития ливней в космических лучах (Х. Баба, В.Гайтлер, Дж. Карлсон, Р.Оппенгеймер).
1939 - Первый расчет модели нейтронной звезды (Р.Оппенгеймер, К.Волков, Л.Д.Ландау).

1939 - Наблюдение частицы космических лучей, остановившуюся в камере Вильсона после прохождения металлической пластинки, и определение ее массу ~ 240 m_e - открытие мю-мезона (К.Андерсон и С.Неддермейер). Данные о существовании этой частицы получили еще в 1936 Андерсон и Неддермейер и в 1937. Стрит и Стивенсон, но эти данные не были достаточно убедительными.
1939 - Нестабильность мезона космических лучей (Г.Куленкампф).
1939 - Разработка математической теории каскадных ливней (Л.Д.Ландау, Ю.Б.Румер).
1940 - Открытие проникающих ливней в космических лучах (Дж.Рочестер, Л.Яноши).
1940 - Прямое подтверждение спонтанного распада μ+ мезона.
1941 - Прямое доказательство в экспериментах на воздушных шарах, что первичные космические лучи состоят главным образом из протонов.
1941 - Измерение времени жизни покоящегося мезона (Ф.Разетти).
1942 - Метод запаздывающих совпадений для определения времени жизни мезона (Б.Росси).
1942 - Идея скалярных и векторных мезонов (Г.Вентцель).
1942 - Механизм рождения мезонов космических лучей – процесс многократного рождения (теория Л.Яноши).
1942 - Гипотеза двух мезонов, прямое подтверждение которой было получено в 1947 (С.Саката, И.Таникава).
1948 - Открытие в первичных космических лучах тяжелых ядер.
1949 - Теория галактического происхождения космических лучей (Э.Ферми).
1950 - Разработка теории множественного образования мезонов космических лучей (Э.Ферми).
1958 - Открытие радиационного пояса Земли (Дж. Ван-Аллен, С.М.Вернов, А.Е.Чудаков).
1973 - Обнаружен космический дейтерий (А.Пензиас, Р.В.Вильсон).

17. Плазма и термоядерный синтез

Важное значение для современной ядерной индустрии имело развитие исследований плазмы и попыткам использования плазменных установок для достижения управляемого термоядерного синтеза.
1934 - Открытие явления сжатия плазмы собственным магнитным полем тока, протекающего по образцу пинч-эффекта (У.Беннетом, Л.Тонко).
1955 - Пуск первых установок «Токамак» (СССР).
1956 - Экспериментальное открытие мюонного катализа (Л.Альварес), предсказанный в 1947 Ф.Франком и в 1953 Я.Б.Зельдовичем).
1957 - Формулировка критерия удержания плазмы при данной плотности и температуре для получения критической точки в балансе энергии (критерий Дж.Д.Лоусона).
1968 - В СССР на установке «Токамак-3» зарегистрированы первые термоядерные нейтроны (Л.А.Арцимович).
1968 - Впервые зафиксировано возникновение нейтронов от плазмы, нагретой лазерным лучом (Н.Г.Басов).