

Национальный исследовательский университет
Высшая Школа Экономики

курс-майнор 2017-2018 уч.года
«Квантовая физика 'для чайников'»

В.Н.Глазков

Лекция 12

Ядерная физика 1:
Строение ядра. Ядерные реакции.

Оглавление

Ядро атома. Краткая история открытия.....	5
Протон и нейтрон: их свойства.....	8
Протон.....	8
Нейтрон.....	8
Взаимодействие протонов и нейтронов в ядре.....	10
Сильное взаимодействие.....	10
Энергия связи ядра и дефект массы.	11
Строение атомного ядра.	13
Изотопы и изобары.....	13
Возбуждённые состояния ядра. Изомеры.....	14
Радиоактивность.....	15
Из истории открытия.....	15
Закон радиоактивного распада.....	18
Альфа-распад.....	19
Бета-распад.....	22
Гамма-излучение.....	27
Ядерные реакции.....	27
Реакция ядерного синтеза.....	27
Спонтанное и индуцированное деление ядер.....	30
Реакции синтеза в звёздах.....	33
Реакции распада и спонтанного деления в природе.....	37
Изотопная датировка.....	39
Радиоуглеродный анализ.....	39
Изотопная датировка в геофизике.	42

Список литературы

- 1: H. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the α - Particles., Proc. Roy. Soc., 82, 495 (1909)
- 2: chemteam.info, Rutherford's Experiment - Part II: The Paper of 1911, 2016, <http://www.chemteam.info/AtomicStructure/Rutherford-Model.html>
- 3: E. Rutherford, The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom, Philosophical Magazine, 21, 669 (1911)
- 4: Нобелевский комитет, Официальный сайт Нобелевского комитета (информация о лауреатах, Нобелевские лекции), , www.nobelprize.org
- 5: С.С.Герштейн, На заре ядерной физики, Природа, 8 (2004)
- 6: Фонд "Новая мысль", Открытие пионов (пи-мезонов). Теория ядерных сил Юкавы, 2016, <http://novmysl.ru/Quantum/Pions.html>
- 7: wikipedia.org, Nuclear binding energies, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy
- 8: wikipedia.org, Isotope, 2012, <http://en.wikipedia.org/wiki/Isotope>
- 9: wikipedia.org, Beta decay, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay
- 10: Лаборатория радиационного контроля ЛРК-1 МИФИ, Азы науки о радиоактивности, 2016, <http://www.radiation.ru/begin/begin.htm>
- 11: А.А.Акатов, Ю.С.Коряковский, Радиация: опасность реальная и вымышленная, 2010
- 12: А.А.Акатов, Ю.С.Коряковский, Радиационная мифология, 2010
- 13: wikipedia.org, Henri Becquerel (английская версия), 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel
- 14: wikipedia.org, Henri Becquerel (французская версия), 2016, http://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel
- 15: wikipedia.org, Alpha decay, , http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_decay
- 16: GAZPROM Informatorium, Producing helium from natural gas, 2016, <http://www.gazprominfo.com/articles/helium/>
- 17: wikipedia.org, Alpha particle spectroscopy, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha-particle_spectroscopy
- 18: wikipedia.org, Radioisotope, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope>
- 19: wikipedia.org, Radioisotope thermoelectric generator, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
- 20: G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210], Proc. R. Soc. Lond. A, 175, 71 (1940)
- 21: wikipedia.org, Double beta decay, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Double_beta_decay
- 22: wikipedia.org, Positron emission tomography, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography
- 23: wikipedia.org, Gamma rays, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray
- 24: wikipedia.org, Nuclear fusion, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion
- 25: P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A , 107, 349 (1925)
- 26: M. L. Oliphant , P. Harteck and Rutherford, Transmutation Effects observed with Heavy Hydrogen, Nature, 133, 413 (1934)
- 27: M. L. E. Oliphant, P. Harteck, Lord Rutherford, Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen, Proceedings of the Royal Society A, 144, 692 (1934)
- 28: wikipedia.org, Nuclear fission, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission
- 29: wikipedia.org, Nuclear chain reaction, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_chain_reaction

- 30: wikipedia.org, Sun, 2016, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>
- 31: В.Н.Глазков, Астрономия, 2015, <http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/astronomy.pdf>
- 32: В.Н.Рыжов, Звездный нуклеосинтез - источник происхождения химических элементов , 2016, <http://www.astronet.ru/db/msg/1167293>
- 33: E. Margaret Burbidge, G. R. Burbidge, William A. Fowler, and F. Hoyle, Synthesis of the Elements in Stars, Rev. Mod. Phys. , 29, 547 (1957)
- 34: wikipedia.org, Proton-proton chain reaction, 2016, [https://en.wikipedia.org/wiki/Proton %E2%80%93proton_chain_reaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain_reaction)
- 35: wikipedia.org, Decay chain, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain
- 36: NASA, Oklo: Ancient African Nuclear Reactors , 2010, <http://apod.nasa.gov/apod/ap100912.html>
- 37: wikipedia.org, Oklo, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Oklo>
- 38: Крис Терни, Кости, скалы и звезды. Наука о том, когда что произошло, 2016
- 39: wikipedia.org, Radiocarbon dating, 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_dating
- 40: wikipedia.org, Dendrochronology, 2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Dendrochronology>
- 41: University of Arizona, Laboratory of Tree-Ring Research, 2016, [http://tree.ltrr.arizona.edu; http://tree.ltrr.arizona.edu/skeletonplot/exampleapplication.htm](http://tree.ltrr.arizona.edu;http://tree.ltrr.arizona.edu/skeletonplot/exampleapplication.htm)
- 42: wikipedia.org, Radiocarbon dating of Shroud of Turin, , https://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_14_dating_of_the_Shroud_of_Turin
- 43: Ю.А.Костицын, Геохимия изотопов и геохронология., 2016, http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Геохимия_изотопов_и_геохронология
- 44: wikipedia.org, Radiometric dating, 2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Radiometric_dating
- 45: NASA, NASA Curiosity: First Mars Age Measurement and Human Exploration Help, 2013, <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-356>
- 46: Moorbath S., Allaart J.H., Bridgwater D. and McGregor V.R. , Rb-Sr ages of early Archaean supracrustal rocks and Amitsoq gneisses at Isua, Nature, 270, 43 (1977)
- 47: Jacobsen S.B., Wasserburg G.J., Sm-Nd isotopic evolution of chondrites, Earth and Planetary Science Letters, 50, 139 (1980)

Ядро атома. Краткая история открытия.

Вспомним экспериментальные факты, подтверждающие существование атомного ядра.

Во-первых, это классические опыты Резерфорда (также известные как опыты Гейгера и Марсдена) [1][2]. Это серия опытов, проведённых в лаборатории Резерфорда в Университете Манчестера. Сами опыты во многом проводились сотрудниками Резерфорда Гансом Гейгером и Эрнестом Марсденом, схемы двух таких опытов приведены на рисунках 1, 2 ниже.

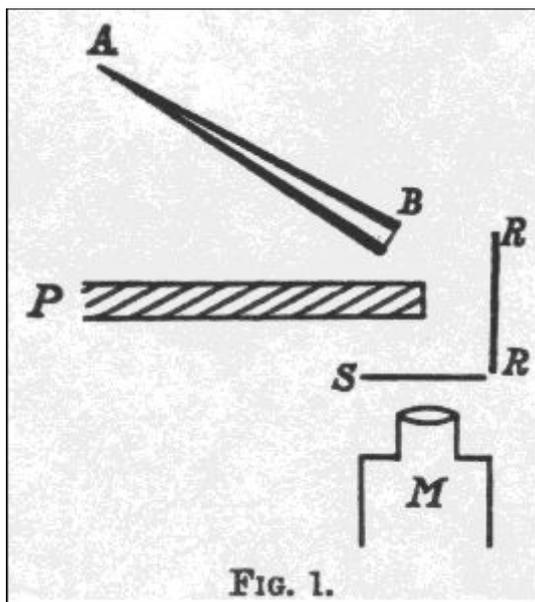


Рисунок 1: Опыт Гейгера-Марсдена (по статье [1]). *AB* - трубка с источником альфа-частиц, *P* - свинцовый экран, *RR* - отражающая фольга, *S* - сцинтилляционный экран, *M* -микроскоп.

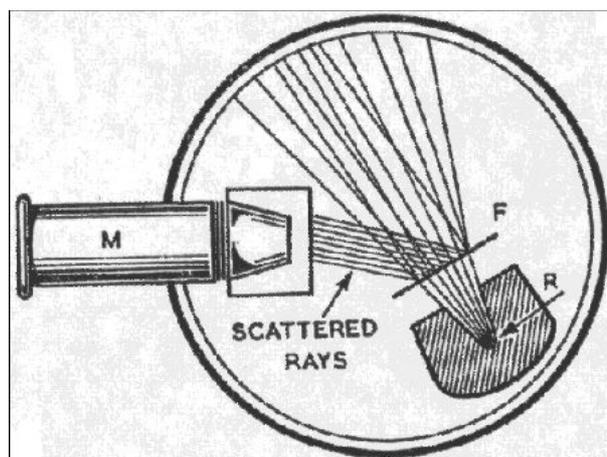


Рисунок 2: Разновидность опыта Резерфорда (с сайта [2]) *R* - источник радиации, *F* - фольга, *M* - микроскоп с сцинтиллирующим экраном.

В опытах изучалось рассеяние альфа-частиц на фольге из разных материалов (Al, Fe, Cu, Ag, Sn, Pt, Au, Pb). Золото оказалось наиболее удобным материалом, так как позволяло изготавливать однородную очень тонкую фольгу (до $8.6 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0.086 \text{ мкм}$).

Основные результаты этих опытов:

- почти все альфа-частицы проходили через фольгу, не отклоняясь от своего направления
- часть альфа-частиц отклоняется на небольшие углы $\sim 1^\circ$
- примерно 1 альфа-частица из 10000 (при толщине фольги в доли микрона) отклоняются на большой угол $\sim 90^\circ$

Резерфорд показал [3], что эти результаты могут быть объяснены в предположении, что существует компактное положительно заряженное ядро, взаимодействие с которым объясняет редкие процессы рассеяния на большой угол.

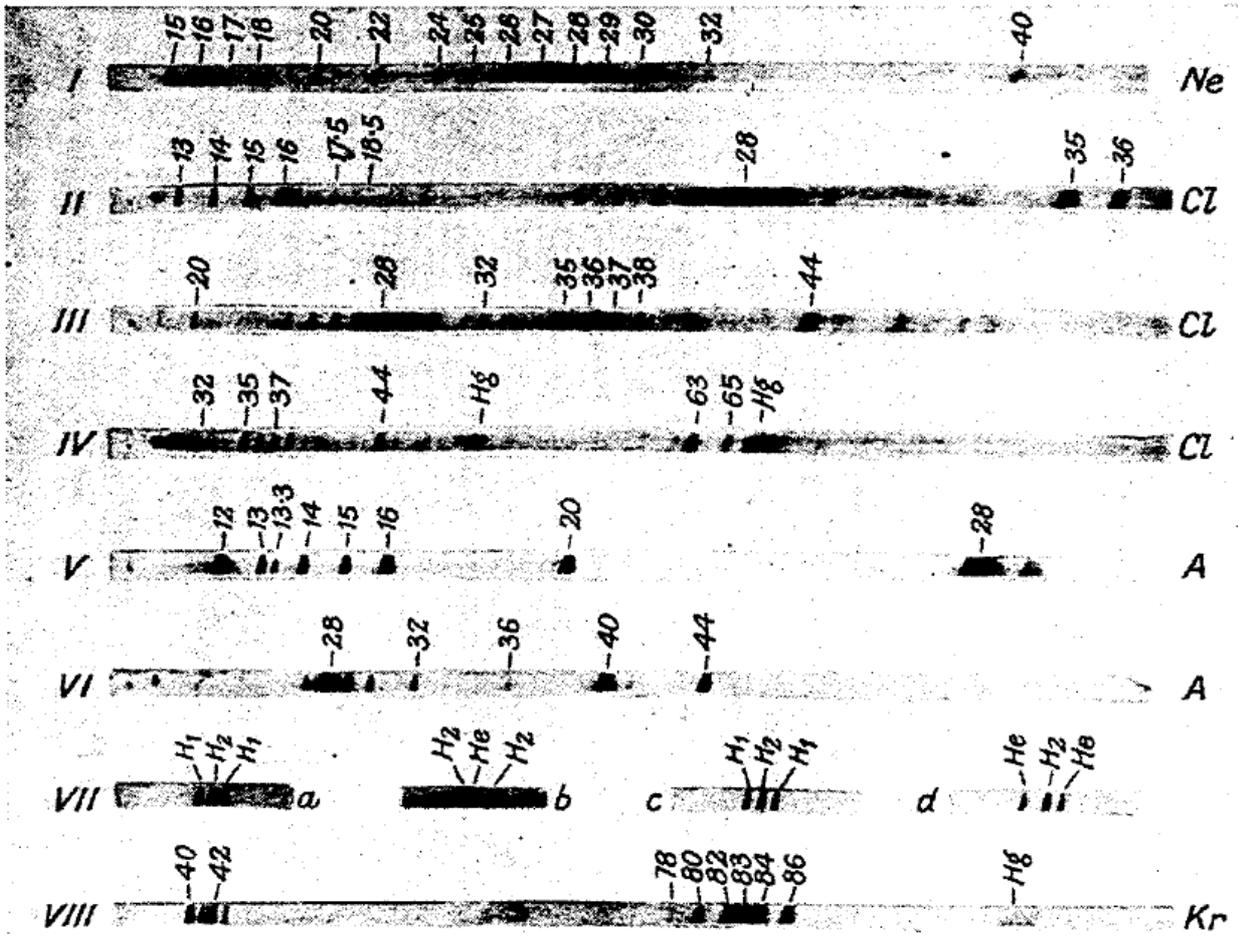


Рисунок 3 Масс-спектры некоторых элементов. Из нобелевской лекции Ф.Астона [4].

Вопрос о том, из чего состоит ядро после опытов Резерфорда оставался открытым. Опыты Ф.Астона по масс-спектрометрии различных изотопов показали, что массы атомов (то есть массы ядер, так как масса электрона примерно в 2000 раз меньше массы ядра атома водорода) с хорошей точностью кратны массе ядра атома водорода — протона (рисунок 3). Опыты Резерфорда в 1917-1919 годах показали, что при бомбардировке азота альфа-частицами образуются протоны, что свидетельствовало о том что протоны содержатся и в других ядрах (фактически, это первая описанная реакция ядерного синтеза $^{14}\text{N} + \alpha \Rightarrow ^{17}\text{O} + p$)

Поэтому место «кирпичика» в строении ядра занял протон — ядро атома водорода. Для компенсации лишнего положительного заряда в ядре предполагалось, что помимо электронов на орбитах часть электронов оказывается внутри ядра. Например, в нобелевской лекции Фрэнсиса Астона (1922 год), формулируется следующая модель строения ядра:

«Нейтральный атом элемента с атомным номером N имеет ядро, содержащее K+N протонов и K электронов, и вокруг этого ядра вращаются N электронов».

С открытием нейтрона Джеймсом Чедвиком в 1932 году (нобелевская премия 1935 года) стало ясно, что в ядре есть два сорта «кирпичиков»: положительно заряженный протон и не несущий заряда нейтрон.

Наконец, можно вспомнить результаты Р.Хофштадтера (нобелевская премия 1961 года) по рассеянию высокоэнергетических частиц, позволившие определить размеры ядер и посмотреть

на распределение заряда в ядре (рисунок 4).

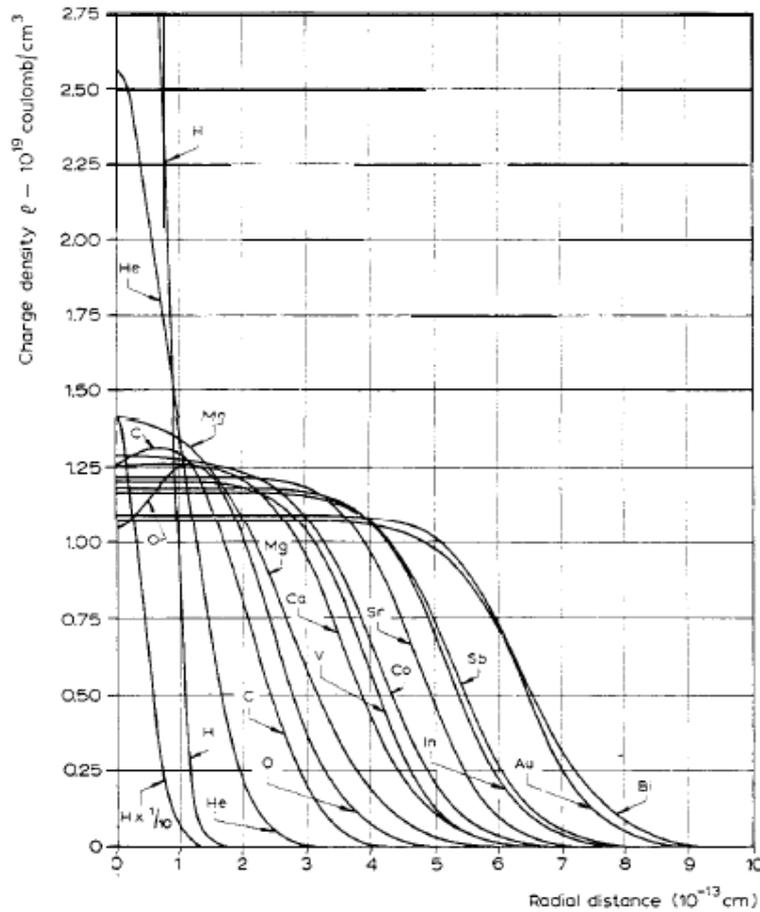


Рисунок 4: Распределение плотности заряда в ядрах разных элементов по результатам рассеяния высокоэнергетических (~100МэВ) электронов. Из нобелевской лекции Р.Хофштадтера [4].

Таким образом, существует достаточно много экспериментальных наблюдений, на основании которых можно установить, что ядро атома — это компактное образование размером около $10^{-13} - 10^{-12}$ см (то есть $10^{-5} - 10^{-4}$ Å, в 10000 раз меньше размера атома), содержащее большую часть массы атома и состоящее в свою очередь из положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов.

Протон и нейтрон: их свойства.

Протон.

Протон — ядро атома водорода, его основные физические свойства:

масса	$1.672621777(74) \times 10^{-27}$ кг (938 МэВ, 1836.15 масс электрона)
спин	1/2
магнитный момент	$2.79 \mu_N$
заряд	+1e
время жизни в свободном состоянии	$>2.1 \times 10^{29}$ лет

Стоит отметить один интересный факт. Протон и электрон обладают одинаковым собственным моментом вращения (спином), одинаковым по модулю зарядом, а отличаются, на первый взгляд, массой. Магнитный момент электрона (с точностью до эффектов, описывающих аномальную поправку) описывается теорией Дирака и равен так называемому магнетону Бора $\mu_B = \frac{e \hbar}{2m_e}$. Протон тяжелее, поэтому для описания магнитного момента ядра используют аналогичную по структуре «масштабную» величину: ядерный магнетон $\mu_N = \frac{e \hbar}{2m_p}$. Однако магнитный момент протона отличается от ядерного магнетона почти в три раза: то есть протон не описывается теорией типа теории Дирака! Как мы увидим позднее, это фактически является следствием (или указанием на) наличия у протона внутренней (кварковой) структуры.

Нейтрон.

Вкратце рассмотрим историю открытия нейтрона.

Как мы же упоминали, около 1920 года достаточно принятой точкой зрения было наличие в ядре протонов и электронов. В то же время Резерфорд высказывал предположение (цитата по нобелевской лекции Чедвика [4]): «*при некоторых условиях может быть возможно для электрона образовывать гораздо более тесную связь с протоном, образуя некий тип нейтральной связанной пары частиц*». Экспериментальным подтверждением этой идеи был бета-распад, когда ядро испускает электрон. 930 году советские физики-теоретики В.А.Амбарцумян и Д.Д.Иваненко выдвинули предположение, что электроны не существуют в ядре, а рождаются в момент бета-распада, а в ядре существует некоторая нейтральная частица [5]. Одновременно, в 1930 году, Вальтер Боте (лауреат Нобелевской премии 1954 года за открытия в исследовании космических лучей) и его студент Герберт Бекер обнаружили, что при бомбардировке лёгких металлов (в частности бериллия) альфа-

частицами возникает нейтральное излучение, изначально принятое ими за разновидность гамма-излучения. Однако дальнейшие исследования показали существенное отличие в проникающей способности. Наконец, в 1932 году Чедвик (Нобелевская премия 1935 года) доказал, что это излучение состоит из частиц с массой близкой к массе протона. Эта частица была названа нейтроном.

Термин «нейтрон» был предложен В.Паули в 1930 году для гипотетической частицы, ответственной за выполнение законов сохранения в бета-распаде (для объяснения непрерывности энергетического спектра бета-электронов и для выполнения закона сохранения момента вращения). Этот «нейтрон Паули» в последствии назвали «нейтрино».

Физические свойства нейтрона:

масса	$1.674927351(74) \times 10^{-27} \text{ кг}$ (939.57 МэВ, 1838.68 масс электрона)
спин	1/2
магнитный момент	$-1.91 \mu_N$
заряд	0
время жизни в свободном состоянии	полураспад 614 сек

Отметим, что масса нейтрона превышает массу протона более чем на одну электронную массу (примерно на 2.5). Поэтому выгоден распад свободного нейтрона на протон, электрон и электронное нейтрино $n \rightarrow p + e + \nu_e$. Электронное нейтрино здесь необходимо для выполнения закона сохранения момента вращения, так как протон, нейтрон и электрон имеют спин 1/2. Разность масс нейтрона и протона невелика по меркам ядерной физики, поэтому в связанном состоянии нейтрон может быть стабильным (стабильные ядра), или жить заметно дольше 600 секунд (некоторые бета-активные ядра имеют период полураспада в миллиарды лет, например рений-187), или даже быть более выгодным состоянием чем протон (ядра испытывающие позитронный бета-распад или К-захват).

Кроме того, удивительным свойством нейтрона является то, что электрически нейтральная частица обладает магнитным моментом. Причём по абсолютной величине этот момент сопоставим с магнитным моментом протона. Это также свидетельствует о том, что у нейтрона есть какая-то внутренняя структура.

Взаимодействие протонов и нейтронов в ядре.

Сильное взаимодействие

Для того, чтобы объединить протоны и нейтроны в компактном ядре, необходимо преодолеть кулоновское расталкивание протонов. Поиск соответствующего способа взаимодействия был важной задачей ядерной физики практически с момента установления существования ядра. Так как это межнуклонное взаимодействие должно быть сильнее электрического, за ним закрепился термин «сильное взаимодействие»¹.

Идея о происхождении ядерных сил была выдвинута японским физиком Юкавой (нобелевский лауреат 1949 года, нобелевская премия была вручена именно за это открытие) в 1934 году. Юкава предположил [6], что взаимодействие протонов и нейтронов происходит путём обмена некоторыми массивными частицами, за которыми закрепилось название π -мезонов («мезо» означает промежуточный, что отражает промежуточное между электроном и протоном значение массы этой частицы) или пионов. Это взаимодействие может быть схематически отобразено следующими диаграммами:

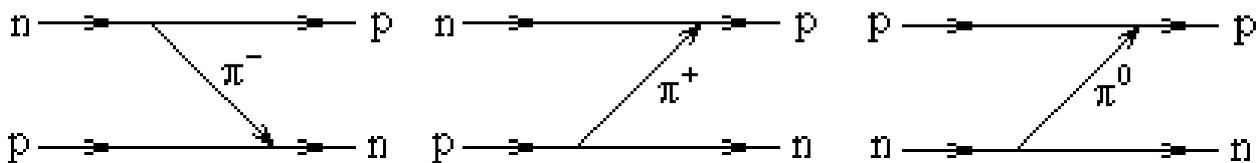


Рисунок 5: Диаграммы взаимодействия протона и нейтрона через различные мезоны. Два протона или два нейтрона взаимодействуют по третьему каналу, с помощью нейтрального π^0 -мезона. С сайта [6].

Поясним эти диаграммы (так называемые диаграммы Фейнмана). Слева изображена исходная пара частиц, справа — конечная. В средней части схематически изображён обмен виртуальными частицами. Например, на левой диаграмме нейтрон испускает виртуальный отрицательный пион π^- и для сохранения заряда превращается в протон, протон поглощает отрицательный пион и становится нейтроном. Аналогично может произойти обмен положительным (средняя) или нейтральным (правая диаграмма) пионами. Так как в квантовой механике частицы неразличимы, то невозможно сказать как именно произошло взаимодействие нейтрона и протона, и все три процесса происходят одновременно. Одинаковые частицы (протоны или нейтроны) могут взаимодействовать только путём обмена нейтральными пионами.

Мы уже приводили оценку для связи расстояния на которое может удалиться виртуальная

¹ Слова «сильное взаимодействие» не надо воспринимать дословно. Мы ещё не раз встретимся в курсе ядерной физики с тем, что некоторые экзотические свойства частиц обозначаются вполне «бытовыми» словами (например, «цвета» кварков или такие характеристики, как «странность» или «очарование»). Причина возникновения такой терминологии связана с тем, что ядерной физике как науке чуть меньше века (или даже около полувека, если начать отсчёт с бурного послевоенного развития этой науки), а язык (русский или английский) к моменту развития этой науки уже вполне сформировался. Поэтому физики — иногда в силу каких-то аналогий, иногда просто в шутку применяли «житейские» слова для обозначения новых свойств ядерного вещества.

частица: $r \sim c \Delta t \sim \frac{c \hbar}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc}$. Требуя, чтобы характерное расстояние для проявления сильного взаимодействия было порядка 10^{-13} см (эта оценка размера ядра была известна, например, из опытов Гейгера и Марсдена), можно получить оценку для массы частиц-переносчиков: $\frac{mc^2}{e} \approx \frac{\hbar c}{re} = \frac{10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{10^{-15} \times 1.6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 2 \cdot 10^8 \text{ эВ} = 200 \text{ МэВ}$.

Пионы были обнаружены экспериментально в космических лучах (Пауэлл, 1947), позднее в ускорителях. Характеристики пионов приведены в таблице ниже:

	масса покоя, МэВ	время жизни, сек	основной канал распада свободной частицы
заряженные π^+ (π^-)	139.57018(35)	$(2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
нейтральный π^0	134.9766 ± 0.0006	$(8.4 \pm 0.6) \times 10^{-17}$	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

Интересно отметить, что времена жизни заряженного и нейтрального пионов сильно отличаются. Это связано с тем, что нейтральный пион может распасться при помощи электромагнитного взаимодействия на два гамма-кванта, в то время как требование сохранения электрического заряда при распаде заряженных пионов позволяет их распад только с участием слабого взаимодействия.

Энергия связи ядра и дефект массы.

Теория относительности предсказывает связь между массой и энергией: всем известное соотношение $E = mc^2$. Ядерная физика является одним из «полигонов» природы, на котором эта связь постоянно проявляется. Масса сколько-нибудь стабильного ядра меньше суммы масс составляющих, поэтому дефект массы обычно отрицателен. Одним из первых точных наблюдений дефекта массы были опыты Ф.Астона по масс-спектрометрии: исследуя масс-спектры смеси молекулярного водорода и гелия Астон обнаружил, что масса гелия-4 немного меньше удвоенной массы молекулы водорода (см. нобелевскую лекцию Ф.Астона [4]).

Одним из способов охарактеризовать взаимодействия в ядре является понятие энергии связи. По определению, энергия связи — это работа, необходимая для того, чтобы разделить ядро на изолированные протоны и нейтроны. По закону сохранения энергии

$$M_{\text{ядра}} c^2 + E_{\text{св}} = (Z m_p + N m_n) c^2$$

$$E_{\text{св}} = (Z m_p + N m_n - M_{\text{ядра}}) c^2$$

где Z и N — числа протонов и нейтронов в ядре, а $M_{\text{ядра}}$ — полная масса ядра.

Оказывается удобным ввести удельную характеристику — энергию связи² на один нуклон $E_{\text{св}} = E_{\text{св}} / (Z + N)$, которая характеризует некоторую среднюю работу на удаление одного нуклона из ядра. Очевидно, что чем больше удельная энергия связи, тем стабильнее ядро.

2 Параллельно с энергией связи в литературе используется понятие дефекта массы. К сожалению в литературе одновременно используется два определения дефекта массы, происходящие из советской и зарубежной традиций. В советской традиции дефектом массы ядра называют разницу между массой ядра, выраженной в атомных единицах массы (1 а.е.м.=1/12 массы изотопа углерода $^{12}\text{C} = 1.6528 \times 10^{-27} \text{ кг} = 931.44 \text{ МэВ}$) и

Зависимость удельной энергии связи на нуклон от ядра является очень важной для описания свойств ядер [7], она показана на рисунке 6.

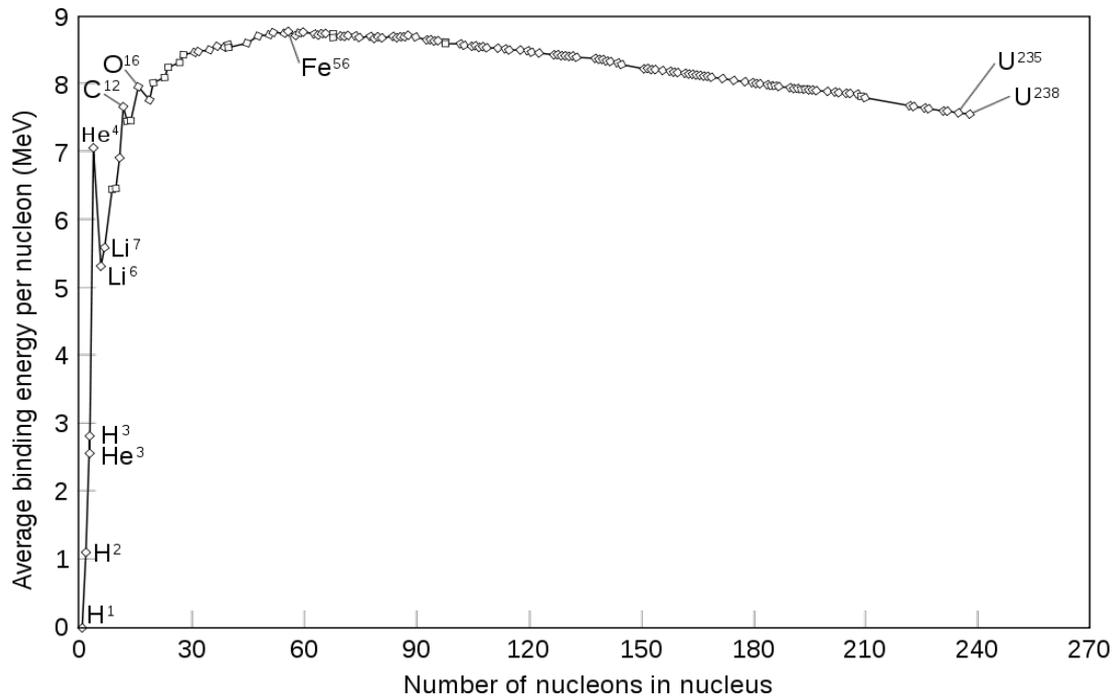


Рисунок 6: Зависимость удельной энергии связи ядра от массы ядра. С сайта [7].

У графика на рисунке 6 есть три особенности:

1. Широкий максимум удельной энергии связи при массовом числе ядра $A \approx 56$. Это означает, что ядра с такими массами являются наиболее сильно связанными и наиболее устойчивыми.
2. При $A > 30$ удельная энергия связи слабо зависит от количества нуклонов в ядре и примерно равна 8МэВ/нуклон. Это свойство называют также насыщением ядерных сил. Оно указывает на то, что нуклон взаимодействует не со всеми остальными нуклонами в ядре (тогда энергия связи одного нуклона со всеми остальными была бы пропорциональна $(A-1)$, а полная энергия связи $A(A-1)$), а только с некоторым количеством «ближайших соседей».
3. Есть острые максимумы в удельной энергии связи, напоминающие максимумы энергии активации для инертных газов.

количеством нуклонов в ядре:
$$\Delta = \frac{M}{\frac{1}{12}M(^{12}\text{C})} - A$$
 . Здесь пренебрегается различием масс протона и

нейтрона, по определению дефект массы равен нулю для изотопа углерода ^{12}C и вообще говоря может быть как положительным так и отрицательным. В зарубежной традиции, дефектом массы называют разность между массами нуклонов и массой ядра $\Delta m = E_{cb}/c^2 = Z m_p + N m_n - M$. В этом определении дефект массы всегда положителен.

Строение атомного ядра.

Изотопы и изобары

В начале 20 века химики и физики обнаружили, что атомы одного и того же химического элемента могут иметь разный вес — эти одинаковые химически но разные физически атомы назвали изотопами (от греческого «изо»-одинаковый и «топос» - место, то есть, «занимающий одно место в таблице Менделеева») [8]. За открытие изотопов были вручены Нобелевские премии Ф.Содди (химия, 1921) «за вклад в наши знания о химии радиоактивных соединений и его исследования в области природы и происхождения изотопов» и Ф.Астон (химия, 1922), «за его открытие при помощи масс-спектрометра изотопов в большом количестве не радиоактивных элементов и за изложение 'правила целых чисел'».

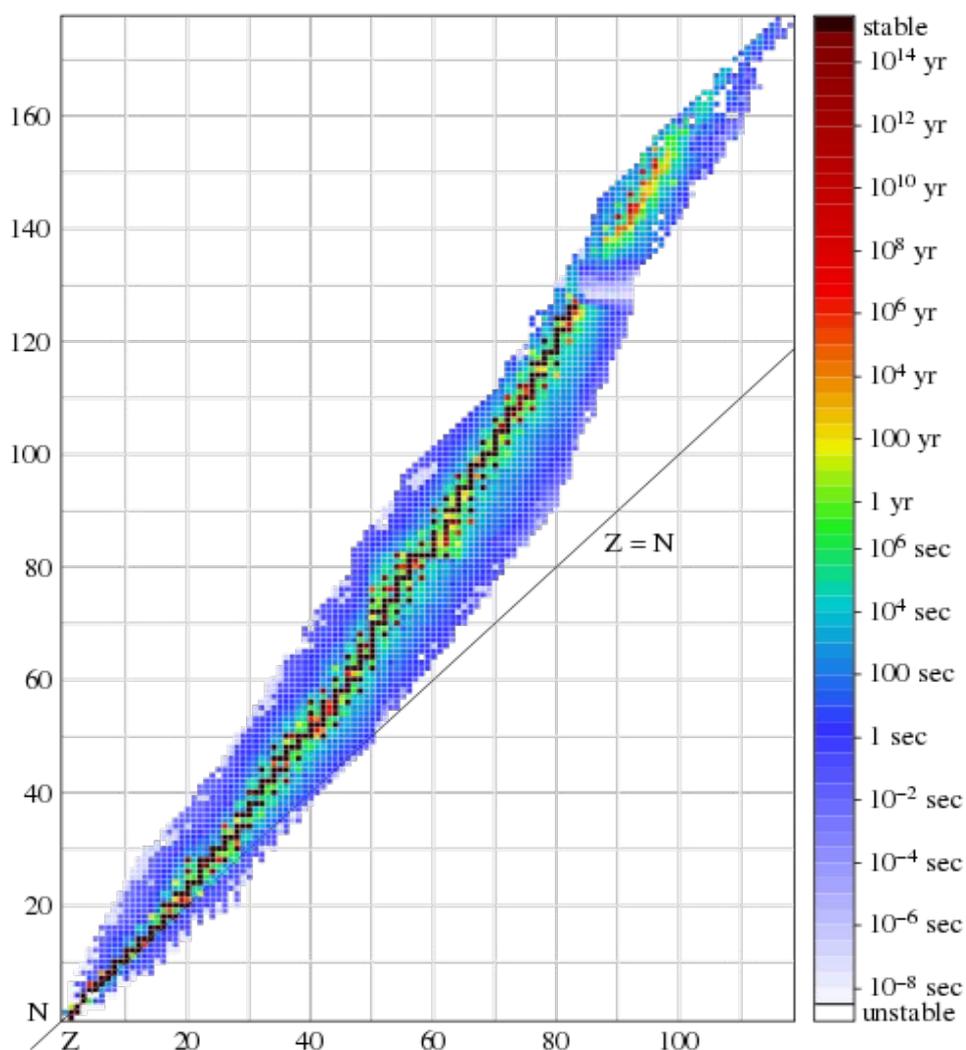


Рисунок 7: Диаграмма времени жизни изотопов с разным числом протонов и нейтронов. Время жизни показано цветом согласно шкале слева. С сайта [8].

С открытием протона и нейтрона стало ясно, что изотопы одного элемента отличаются

количеством нейтронов в ядре. Отметим также, что утверждение о химической эквивалентности изотопов — приближённое. Так как образование химических связей определяется внешними электронами, то это (статическое) свойство одинаково у всех изотопов. Однако динамика (химическая кинетика) зависит от массы атома (например, в силу зависимости скорости движения атомов от их массы). Поэтому, например, в живых организмах можно заменить только 10-50% воды на тяжёлую (дейтериевую) воду. Несмотря на отсутствие радиоактивности, именно из-за нарушения кинетики большая концентрация приведёт к нарушению клеточных функций и гибели клеток.

Помимо изотопов (атомы с одинаковыми химическими свойствами, но разной массой), отдельного названия удостоились изобары — атомы с разными химическими свойствами, но одинаковым полным количеством нуклонов (например, тритий и гелий-3). Во избежание путаницы с понятием изобары в термодинамике (процесса при постоянном давлении), отметим, что в данном случае «бар» произошло от слова «барион», по имени семейства элементарных частиц, включающего в себя протон и нейтрон.

Статистика по изотопам (рисунок 7) показывает, что число протонов и нейтронов в ядре совсем не произвольно. Существует очень узкая «долина стабильности» на плоскости $(Z-N)$, в которой лежат стабильные изотопы. Для лёгких атомов эта долина лежит близко к прямой $Z=N$, более тяжёлые ядра имеют больше нейтронов, чем протонов.

Возбуждённые состояния ядра. Изомеры.

За анализ коллективных степеней свободы в ядре была присуждена Нобелевская премия по физике 1975 года О.Бору (сыну Нильса Бора), Б.Моттelsonу и Д.Рейнуотеру. На качественном уровне заметим, что некоторые возбуждённые состояния ядра могут быть визуализованы. Во-первых, это простая деформация капли, переход от сферической к вытянутой эллиптической форме. Во-вторых, сразу с отклонением от сферической формы возникнут вращательные уровни энергии. Кроме этого, возможны различные колебания нуклонов, наиболее необычным из которых является так называемый гигантский резонанс — одновременное колебание всех протонов относительно всех нейтронов. Типичное значение энергии возбуждения в ядре составляет единицы и десятки МэВ.

Как и в случае переходов между атомными подуровнями, ядро может поглотить или испустить энергию (в форме гамма-кванта или продукта распада), соответствующую расстоянию между возбуждённым уровнем и основным состоянием ядра. Однако в некоторых случаях переход из возбуждённого в основное состояние оказывается запрещён каким-либо законом сохранения, и тогда ядро может оставаться в возбуждённом состоянии гораздо дольше, чем этого можно ожидать в «нормальном» случае. Такое метастабильное (то есть «почти-стабильное») состояние ядра называют изомером. Первые изомеры были обнаружены в опытах Отто Гана с протоактинием (О.Ган - Нобелевский лауреат по химии 1944 года «за открытие распада тяжёлых ядер»). Для обозначения ядра в изомерном (метастабильном) состоянии к атомной массе добавляют индекс «m», например «кобальт-57m» или ${}_{27}^{57m}\text{Co}$.

Характерное время жизни ядра в «нормальном» возбуждённом состоянии составляет порядка 10^{-12} сек. Поэтому к изомерным состояниям относят состояния, в которых ядро находится 10^{-9} секунды или дольше. Среди изомеров есть рекордсмены с большими временами жизни: изомер тантала ${}_{83}^{180m}\text{Ta}$ с временем жизни оцениваемым в 10^{15} лет (содержится в природных образцах в отношении около 1:8300, релаксирует с испусканием фотона с энергией 75 кэВ),

изомер гафния ${}_{72}^{178m2}\text{Hf}$ имеет период полураспада 31 год и является рекордсменом по энерговыделению (релаксирует с испусканием гамма-кванта с энергией 2.45МэВ, 1 грамм этого изомера выделяет при релаксации энергию эквивалентную более чем 300 кг ТНТ), изомер хольмия ${}_{67}^{166m1}\text{Ho}$ имеет период полураспада 1200 лет.

Изомеры обнаруживаются либо по их характерному излучению, либо по слабому влиянию на атомные и ядерные спектры поглощения (изомерный сдвиг спектральных линий).

Радиоактивность

Из истории открытия

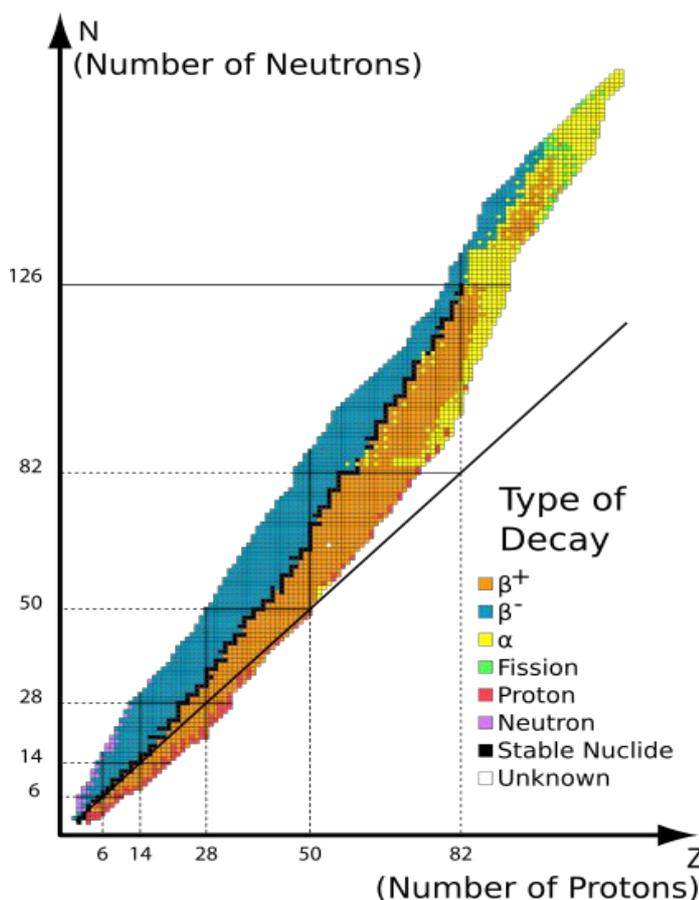


Рисунок 8: Виды радиоактивных распадов в зависимости от изотопа. С сайта [9].

Радиоактивностью или радиоактивным распадом называют явление испускания ядрами частиц или гамма-квантов, иногда³ сопровождающееся превращением ядра в ядро другого элемента. Радиоактивность бывает естественная, если распад возникает в ядрах, сохранившихся с момента их образования, и искусственной, если распадающееся ядро было получено искусственным путём, например бомбардировкой стабильного ядра частицами. Физически, различия между естественной и искусственной радиоактивностью нет. Во избежание терминологической путаницы, выделим отдельно явление деления ядер, которое рассмотрим позже. То есть, к радиоактивности отнесём только явления сопровождающиеся вылетом относительно лёгких частиц (не тяжелее альфа-частиц). Примерная склонность ядер различных изотопов к разным видам радиоактивного распада показана на рисунке 8 [9].

С понятием радиоактивности и радиации связан вопрос о воздействии радиации на живые организмы. Этот вопрос является важным для нашей безопасности, с ним

связано много мифов и пугающих историй, часто распространяемых недобросовестными средствами массовой информации. В нашем курсе мы рассматриваем физические аспекты явления радиоактивности, поэтому вопросы радиационной безопасности мы систематически рассматривать не будем. Для подробного, но достаточно компактного, обзора сведений по

3 При излучении ядром гамма-квантов превращения ядра не происходит, при излучении ядром альфа- и бета-частиц или протонов меняется заряд ядра, при испускании нейтронов меняется массовое число без изменения заряда.

этой теме можно рекомендовать сайт Лаборатории радиационного контроля ЛРК-1 МИФИ [10], подготовленные Общественным советом Госкорпорации «Росатом» брошюры [11], [12].

Исторически, радиоактивность как физическое явление была обнаружена и исследована в 1896 году Антуаном Анри Беккерелем [13][14]. Интересно отметить, что Беккерель происходил из семьи с богатой научной историей: он сам, его отец (Александр-Эдмон Беккерель) и дед (Антуан-Сезар Беккерель) были членами французской Академии наук⁴. Сын А.А.Беккереля (Жан Беккерель) также был физиком, известным своими работами об оптических и магнитных свойствах кристаллов. Все четверо в своё время возглавляли кафедру физики в Национальном музее естественной истории.

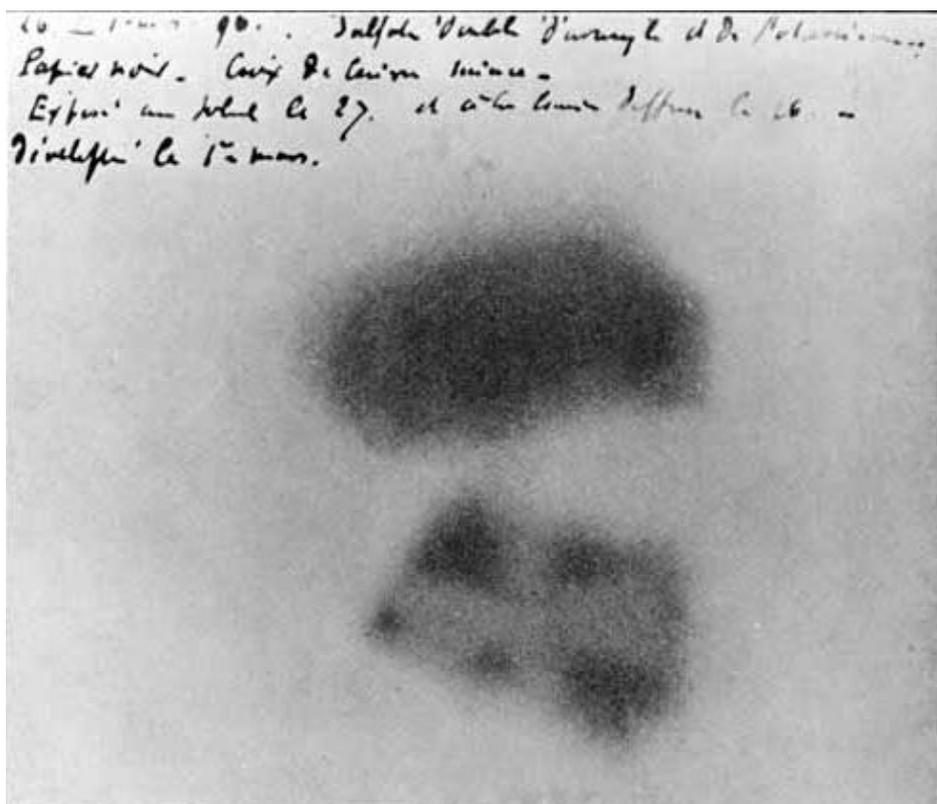


Рисунок 9: Изображение урановой соли на фотопластинке, полученное Беккерелем. Видна "тень" от мальтийского креста, помещённого между солью и фотопластинкой. С сайта [13].

4 Во Франции Академия наук является частью так называемого Института Франции (*Institut de France*) наряду с четырьмя другими национальными академиями, одной из которых является знаменитая Французская академия, состоящая из 40 «бессмертных» членов)



Рисунок 10: Слева: Полированный срез минерала уранита (урановая смолка, урановая смоляная обманка). Справа: Радиационная засветка фотопластинки от контакта с образцом уранита. С сайта [14].

Открытие было совершено случайно, Беккерель исследовал флюоресценцию солей урана и пытался доказать, что излучаемые лучи родственны рентгеновским, которые можно обнаружить по засветке фотопластинки. Эксперимент состоял в том, что соль урана (природный минерал) подвергался засветке солнечным светом, а потом рядом с ним помещалась закрытая фотопластинка, на которой обнаруживалась засветка. Эксперимент пришлось прервать из-за плохой погоды, однако через несколько дней обнаружилось, что лежавшая в ящике стола рядом с урановой солью пластинка почернела (рисунки 9, 10). То есть, излучение оказалось не связано с освещением образца. К этим исследованиям подключились супруги Кюри (Мария Склодовская-Кюри исследовала это излучение в рамках своей диссертации), которые выделили полоний и радий, химические элементы являвшиеся источником этого излучения. Авторство термина «радиоактивность» (т.е. «способность к излучению») приписывается М.Склодовской-Кюри. За открытие спонтанной радиоактивности Беккерель, Мария и Пьер Кюри удостоились Нобелевской премии по физике 1903 года.

Само явление испускания неких «лучей» урансодержащим минералом было обнаружено около 1857 года французским изобретателем и пионером фотографии Абелем Непсом де Сант-Виктор (Abel Niepce de Saint-Victor), однако подробных исследований проведено не было и Непс остался убеждённым сторонником того, что наблюдаемое излучение является формой люминесценции.

Также непосредственно с радиоактивностью связаны три ранних Нобелевских премии по химии:

- Э.Резерфорд, 1908 год, «за его исследования распада элементов и за химию

радиоактивных веществ».

- М.Склодовская-Кюри, 1911 год, «в признание её заслуг в развитие химии, проявившихся в открытии элементов радия и полония, выделении радия и изучения происхождения и соединений этого примечательного элемента»
- Ф.Соди, 1921 год, «за его вклад в наше знание о химии радиоактивных веществ и его исследования происхождения и природы изотопов».

Рассмотрим подробнее математические закономерности радиоактивного распада и основные виды распада.

Закон радиоактивного распада.

Спонтанный распад это внутреннее свойство ядра, характеризующееся какой-то вероятностью того, что этот распад произойдёт за единицу времени. Причём эта вероятность неизменна. Таким образом, если в момент времени $t=0$ у нас был образец, содержащий N_0 радиоактивных ионов, то уменьшение их числа за счёт распада за интервал dt описывается уравнением

$$dN = -\lambda N dt$$

Здесь N — количество нераспавшихся ионов в момент времени t , λ - постоянная распада, имеющая размерность $[1/c]$, знак «минус» соответствует убыванию числа радиоактивных ионов со временем. Решаем это уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\ d(\ln N) &= -\lambda dt \\ \ln N &= \text{const} - \lambda t \\ N &= N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-(\log_2 e)\lambda t} = N_0 2^{-t/T_{1/2}} \end{aligned}$$

в последней строчке мы воспользовались начальным условием, подобрав константу так, чтобы в начальный момент было N_0 радиоактивных ионов. Параметр $T_{1/2}$ - это период полураспада, время за которое число нераспавшихся ионов уменьшается в два раза. Период полураспада и постоянная распада связаны соотношением $\lambda T_{1/2} = \frac{1}{\log_2 e} = \ln 2$.

Среднее время жизни радиоактивного ядра отличается от $T_{1/2}$:

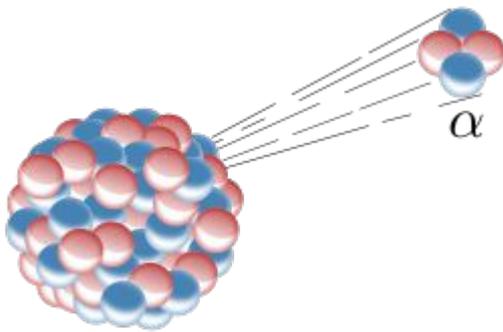
$$\langle T \rangle = \frac{\int_0^{\infty} t N(t) dt}{\int_0^{\infty} N(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t N_0 e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \approx 1.44 T_{1/2}$$

Радиоактивные препараты характеризуют активностью⁴, равной числу распадов в секунду $A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$. Активность измеряется в беккерелях (сокращённо Бк), один беккерель равен одному распаду в секунду. Видно, что активность, количество ядер в препарате и период полураспада (константа распада) связаны между собой простыми соотношениями,

⁴ Активность является характеристикой не ядра, а всего препарата, она зависит от количества ядер в препарате.

зная любые две величины можно найти третью. Именно по измерению активности измеряются периоды полураспада долгоживущих ядер.

Альфа-распад.



Альфа-распадом называется вид радиоактивного распада при котором ядро испускает альфа-частицу, то есть ядро атома гелия [15]. После альфа-распада конечное ядро оказывается смещено на две позиции влево по периодической таблице. Кроме альфа-распада, альфа-частицы могут образовываться в некоторых процессах деления, как побочный продукт распада (помимо двух основных осколков). Этот механизм отличается от альфа-распада, в частности, возможно появление высокоэнергетичных альфа-частиц.

Рисунок 11: Альфа-распад ядра (в представлении художника). [Сайта \[15\]](#).

Альфа-частицы были выделены в отдельный вид излучения в опытах Резерфорда и Вилларда (1899-1900) как часть «эманаций урана» с наименьшей проникающей способностью. Названия «альфа», «бета» и «гамма» для компонент излучения с разной проникающей способностью были предложены также Резерфордом. После этого было установлено, что альфа-частицы несут заряд $+2e$, как и ядро гелия. Наконец, в 1907 году в опытах Резерфорда и Ройдса было окончательно показано спектрометрически, что после нейтрализации альфа-частицы превращаются в атомы гелия. Наличие гелия в урансодержащих минералах было установлено Рамзаем ранее, в 1895 году. Резерфорд получил прямое доказательство того, что этот гелий происходит из альфа-частиц⁵.

Условие энергетической возможности альфа-распада может быть очевидным образом сформулировано через энергию связи ядра:

$$E_{св}(A, Z) < E_{св}(A-4, Z-2) + E_{св}(\alpha) .$$

Знак неравенства может показаться неожиданным, но он связан с определением энергии связи: энергия связи тем больше, чем меньше масса ядра при том же количестве нуклонов. При переходе к массам ядер неравенство сменит знак:

$$M(A, Z) > M(A-4, Z-2) + M(\alpha) .$$

Энергия связи на нуклон в альфа-частице около 7МэВ (рисунок 6), что меньше чем энергия связи на нуклон в тяжёлых ядрах. Переходя к удельной энергии связи $\epsilon = E_{св}/A$ можно показать что условие возможности распада превращается в:

$$\epsilon(A, Z) = \frac{E_{св}(A, Z)}{A} < \frac{A-4}{A} \epsilon(A-4, Z-2) + \frac{4}{A} \epsilon(\alpha) = \epsilon(A-4, Z-2) - \frac{4}{A} (\epsilon(A-4, Z-2) - \epsilon(\alpha))$$

Так как удельная энергия связи в тяжёлых ядрах убывает с атомным номером, это условие выполняется для тяжёлых ядер. При снижении атомного номера второе слагаемое (пропорциональное $1/A$) уменьшает правую часть, что ограничивает количество ядер,

5 Гелий, используемый в технике (и для надувания воздушных шаров) получают промышленно выделением из природного газа. В подземных месторождениях гелий образуется именно за счёт альфа-распада радиоактивных изотопов в окружающих горных породах. Содержание гелия в наиболее богатых месторождениях достигает 0.5% (объёмного) [16].

способных к альфа-распаду. Такой распад может происходить у ядер с $Z > 83$ и у некоторых редкоземельных изотопов с $A = 140 \dots 160$.

Период полураспада для альфа-распада меняется в широких пределах: от $3 \cdot 10^{-7}$ сек для ${}^{212}_{84}\text{Po}$ до $1.4 \cdot 10^{17}$ лет для ${}^{204}_{82}\text{Pb}$. Однако энергия альфа-частиц, образующихся при распаде обычно имеет значение от 4 до 9 МэВ (что соответствует скоростям 15000-20000 км/сек). Верхний предел энергии близок к максимальной энергии связи в ядрах — и имеет достаточно простое объяснение: если в исходном ядре имеется избыток энергии превышающий энергию связи нуклона, то возможен процесс с вылетом нейтрона или протона, который более вероятен, чем процесс требующий одновременного участия четырёх частиц. Нижний предел энергии связан с тем, что для ядер, испускающих низкоэнергетичные альфа-частицы, период полураспада быстро растёт.

Спектр альфа-частиц (распределение по энергиям) состоит из одной или нескольких узких линий. Значения энергии частиц и вид спектра индивидуален для разных изотопов (рисунок 12) [17]. Дискретный характер спектра связан с тем, что при испускании альфа-частицы происходит переход между определёнными состояниями исходного и конечного ядра, и энергия альфа-частиц и конечного ядра оказываются жёстко определены законами сохранения энергии и импульса. В этом смысле происхождение дискретного спектра аналогично линейчатому спектру излучения атомов. Для некоторых изотопов в спектре альфа-распада наблюдается несколько линий, это связано с тем, что после испускания альфа-частицы возможен переход не только в одно основное состояние конечного ядра, но и в его возбуждённые состояния, релаксация из которых может идти по другим каналам (например, испусканием гамма-кванта).

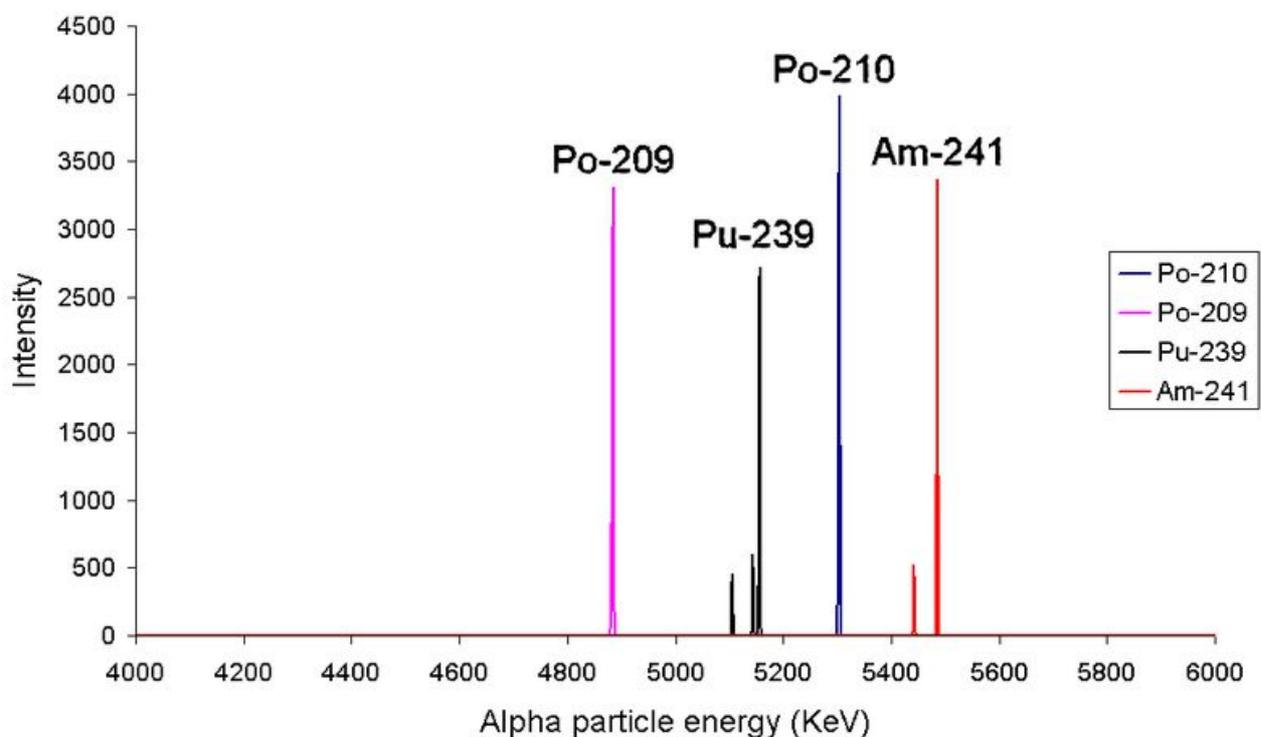


Рисунок 12: Спектры альфа-частиц от разных источников. С сайта [17].

Маленькая проникающая способность альфа-излучения позволяет использовать альфа-активные источники в некоторых практических приложениях [18]. Некоторые детекторы дыма используют альфа-активные изотопы для ионизации воздуха в зазоре между электродами (рисунки 13, 14). Частицы дыма увеличивают эффективное сопротивление зазора, которое может быть зафиксировано электроникой. Альфа-активные изотопы являются предпочтительным источником энергии для радиоизотопных термоэлектрических генераторов [19]. В этих приборах энергия альфа-частиц превращается в тепло, которое при помощи термопар преобразуется в электрическое напряжение. Например, изотоп плутония ^{238}Pu выделяет около полуватта тепловой мощности на грамм (рисунок 15). Такие источники электричества используются на космических зондах, в удалённых местах (маяки, метеостанции), а также в некоторых моделях вживляемых кардиостимуляторов. Ионизирующее действие альфа-частиц используется для снятия статического заряда.



Рисунок 13: Контейнер для амерция-241 в бытовом детекторе дыма. С сайта [18].



Рисунок 14: Капсула амерция-241 из бытового детектора дыма. Оболочка - алюминий, тёмный элемент в центре - диоксид амерция-241. С сайта [18].

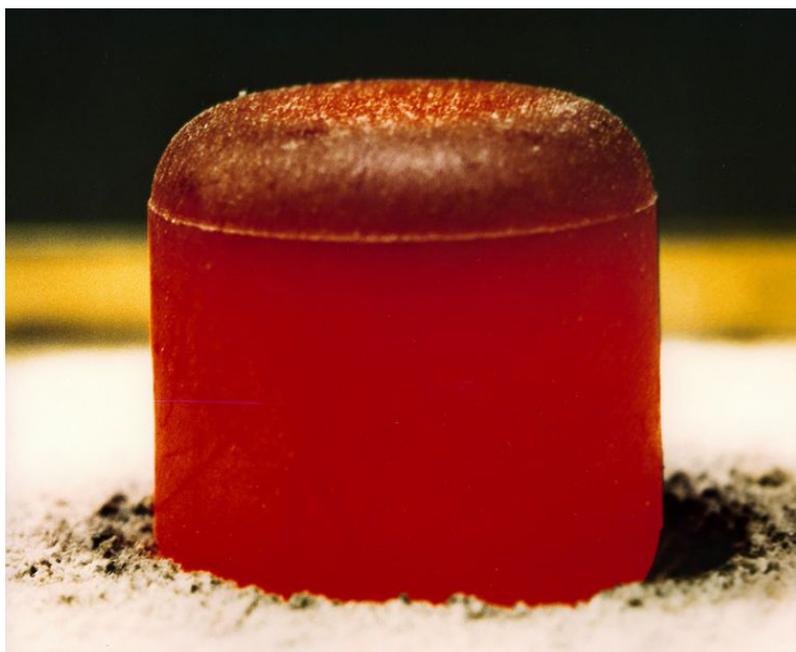


Рисунок 15: Таблетка оксида плутония $^{238}\text{PuO}_2$ для радиоизотопного термоэлектрического генератора космического зонда («Кассини» или «Галилео»). Цвет связан с тепловым излучением от разогретой альфа-частицами таблетки. С сайта [19].

Бета-распад.

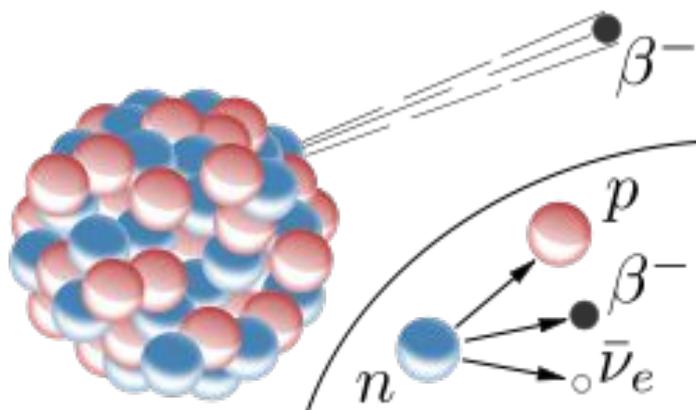


Рисунок 16: Электронный бета-распад (представление художника). На врезке в правом нижнем углу - продукты распада нейтрона. С сайта [9]

К процессам бета-распада относят несколько процессов, связанных с взаимопревращением нейтрона и протона, при которых происходит испускание или захват электрона либо испускание позитрона. При этом ядро превращается в ядро-изобару (ядро с тем же атомным номером), сдвигаясь в таблице Менделеева на одну⁶ клетку влево (К-захват или позитронный β^+ -распад) или вправо (электронный β^- -распад). Все эти процессы происходят посредством слабого взаимодействия, поэтому периоды полураспада в этих процессах обычно довольно велики, обычно минуты и часы.

⁶ За исключением редко встречающихся процессов двойного бета-распада

От процессов бета-распада необходимо отличать процессы внутренней конверсии, когда снятие возбуждения ядра происходит через передачу избыточной энергии одному из внутренних электронов. При этом *атом* также испускает электрон, однако *ядро* остаётся неизменным по составу и отсутствует испускание нейтрино. Бета-излучение было выделено как отдельный вид частиц Резерфордом в 1899 году. Беккерель в 1900 году определил удельный заряд этих частиц и обнаружил, что он совпадает с удельным зарядом электрона, измеренным ранее Дж.Дж.Томсоном.

В отличие от альфа-частиц, спектр бета-частиц непрерывный [20], начинающийся с нулевых энергий (рисунок 17). Максимальная энергия бета-частиц во всех ядрах ограничена примерно 10МэВ, при большем избытке энергии в ядре становится возможным испускание одиночного нуклона, которое гораздо более вероятно, так как связано с сильным взаимодействием. При энергии бета-частицы порядка 1МэВ испускаемые электроны и позитроны являются релятивистскими (масса покоя электрона 0.511МэВ) и при их рассмотрении необходимо учитывать эффекты теории относительности.

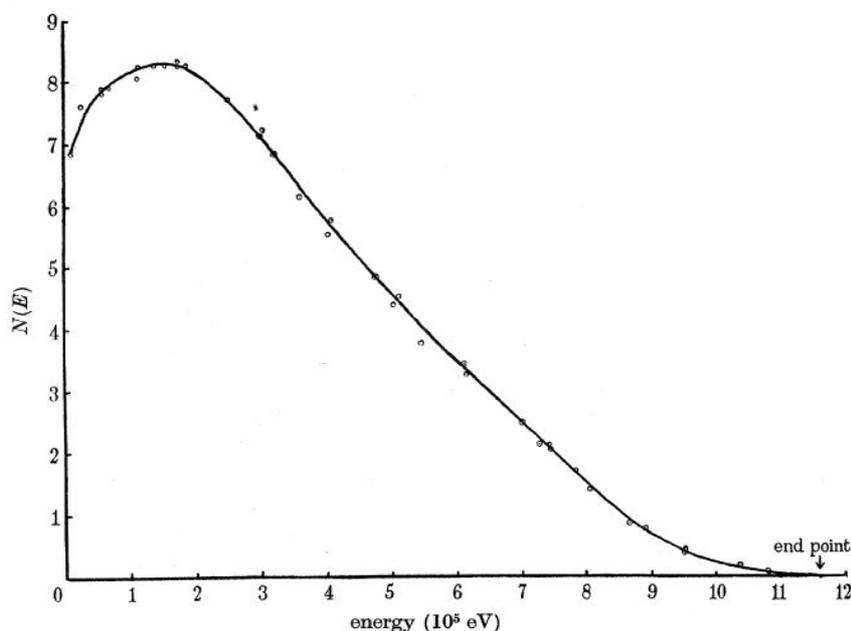


Рисунок 17: Энергетический спектр электронов при бета-распаде висмута-210. Из статьи [20].

Непрерывность распределения бета-частиц по энергии связана с тем, что в процессе бета-распада участвует и третья частица: электронное нейтрино или антинейтрино. Без учёта третьей частицы невозможно получить непрерывный спектр испускаемых частиц при заданной разности энергий исходного и конечного ядра: законы сохранения энергии и импульса дают единственное решение в двухчастичном процессе, что должно приводить к дискретному спектру (как у альфа-частиц). Существование нейтрино было предположено В.Паули в 1930 для объяснения непрерывного спектра бета-распада. Более подробная теория была построена Э.Ферми в 1934. Нейтрино — это незаряженная и практически безмассовая частица¹. В процессе бета-распада нейтрино уносит некоторую (случайную) часть энергии и

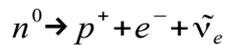
¹ Современная верхняя оценка массы покоя электронного нейтрино составляет около 1.5эВ, однако наблюдение превращения разных нейтрино друг в друга (нейтринных осцилляций) показывает на наличие некоторой ненулевой массы всех нейтрино.

импульса.

Рассмотрим подробнее виды бета-распада (отметим сразу, что все эти процессы оказываются не внутриядерными, а внутринуклонными):

Электронный бета-распад или β^- -распад.

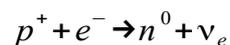
В этом процессе нейтрон испускает электрон и электронное антинейтрино, превращаясь в протон. Реакция распада:



В этом процессе испускается электрон, заряд ядра увеличивается на 1 (смещение вправо на одну позицию в таблице Менделеева). Образующийся атом оказывается ионизованным, так как энергия вылетающего электрона гораздо больше энергии связи внешних электронов в атоме. Этот процесс обычно происходит в ядрах с избытком нейтронов. Если Z - число протонов в исходном ядре, а $E(A, Z, N_e)$ полная энергия иона (включая энергию ядра и электронов) то условие энергетической выгодности такого распада $E(A, Z, N_e) > E(A, Z+1, N_e) + m_e c^2$.

К-захват.

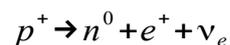
В этом процессе ядром захватывается электрон внутренней электронной орбитали (обычно самой нижней 1s или К-орбитали):



В том процессе испускается только трудноуловимое нейтрино, заряд ядра уменьшается на 1 (смещение влево в таблице Менделеева). Процесс идёт в ядрах с избытком протонов. Условие энергетической выгодности $E(A, Z, N_e) > E(A, Z-1, N_e-1)$

Позитронный бета-распад или β^+ -распад.

В этом процессе в ядре с избытком протонов один из протонов испускает позитрон и электронное нейтрино, превращаясь в нейтрон:



Заряд ядра, как и при К-захвате уменьшается на 1 (сдвиг влево в таблице Менделеева). Отметим, что свободный протон стабилен, его распад возможен только внутри ядра, где из-за взаимодействия нуклонов энергия протонного состояния может оказаться выше энергии нейтронного состояния. Также можно заметить, что процесс К-захвата энергетически выгоднее позитронного распада, так как при К-захвате используется внутриатомный электрон, а при позитронном распаде рождается позитрон, что даёт различие по энергии на $2m_e c^2$, условие энергетической выгодности позитронного распада $E(A, Z, N_e) > E(A, Z-1, N_e) + m_e c^2 \approx E(A, Z-1, N_e-1) + 2m_e c^2$. То есть, всегда параллельно с позитронным распадом происходит и процесс К-захвата, в то время как при малой разности энергий исходного и конечного атомов возможны случаи, когда происходит только К-захват.

Двойной бета-распад.

Наблюдались процессы, когда одновременно испускается два электрона (соответственно, сдвиг происходит на две позиции вправо в таблице Менделеева) [21]. Такой процесс происходит обычно параллельно с более интенсивным обычным бета-распадом, поэтому его

достаточно трудно наблюдать. Обычно для наблюдения двойного бета-распада необходимо, чтобы прямой бета-распад был энергетически невыгоден. Такой распад наблюдался в нескольких изотопах: ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Gd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{130}Ba , ^{136}Xe , ^{150}Nd , ^{238}U . В случае урана-238 продуктом двойного бета-распада является плутоний-238. Теоретически также возможны процессы двойного К-захвата, двойного позитронного распада и одновременного К-захвата и позитронного распада, однако такие процессы не наблюдались на фоне более вероятных обычных процессов бета-распада.

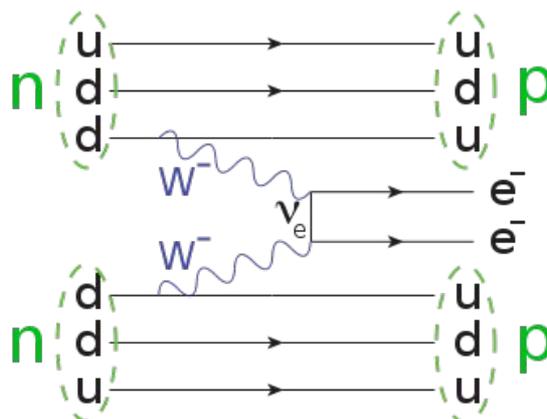


Рисунок 18: Диаграмма Фейнмана для гипотетического двойного безнейтринного бета-распада. С сайта [21].

Теоретически возможен как «нормальный» двойной бета-распад, при котором образуется два нейтрино, так и безнейтринный двойной бета-распад, в котором нейтрино выступает как виртуальная частица, рождаясь и тут же уничтожаясь. Такой процесс возможен, если нейтрино и антинейтрино являются одной и той же частицей (так называемые майорановские частицы) и обладают некоторой массой (наличие которой следует из обнаруженных нейтринных осцилляций). Обнаружение такого эффекта позволило бы получить информацию о массе нейтрино. Поиски безнейтринного двойного бета-распада активно ведутся в нескольких лабораториях, но пока не дали положительного результата (список экспериментов приведён на сайте [21]).

Интересно отметить, что одно и то же ядро может одновременно испытывать разные виды бета-распада: приведённые выше энергетические соображения о выгоде бета-распадов разных типов не являются взаимоисключающими. Например, в уже упоминавшемся ядре изотопа меди-64 могут происходить электронный бета-распад (39%, образуется цинк-64), позитронный бета-распад (17%, образуется никель-64) и К-захват (43%, образуется никель-64).

Важные практические применения бета-активных изотопов связаны с медицинской диагностикой. Встраивая изотопы в биологически активные молекулы можно добиться скопления «меченных» молекул в определённых органах пациента. Одной из техник является позитронная эмиссионная томография [22], при которой используется процесс позитронного бета-распада. Затормаживающийся в тканях позитрон аннигилирует с электроном образуя пару гамма квантов, разлетающихся в противоположных направлениях⁷, которые улавливаются детектором. Детектор работает по принципу схемы совпадений — для исключения случайных срабатываний (например, пролёт частицы космического излучения) учитываются только события, когда массивом детекторов зафиксировано одновременно два гамма-кванта. Два сработавших детектора определяют прямую, на которой лежала точка аннигиляции — то есть точка накопления «меченных» изотопом молекул. Набором статистики и её компьютерной обработкой удаётся по множеству таких построений построить карту плотности распределения накопленных «меченных» молекул. Также рассматриваются возможности использования ионизирующего действия бета-излучения для проведения локальной противораковой лучевой терапии.

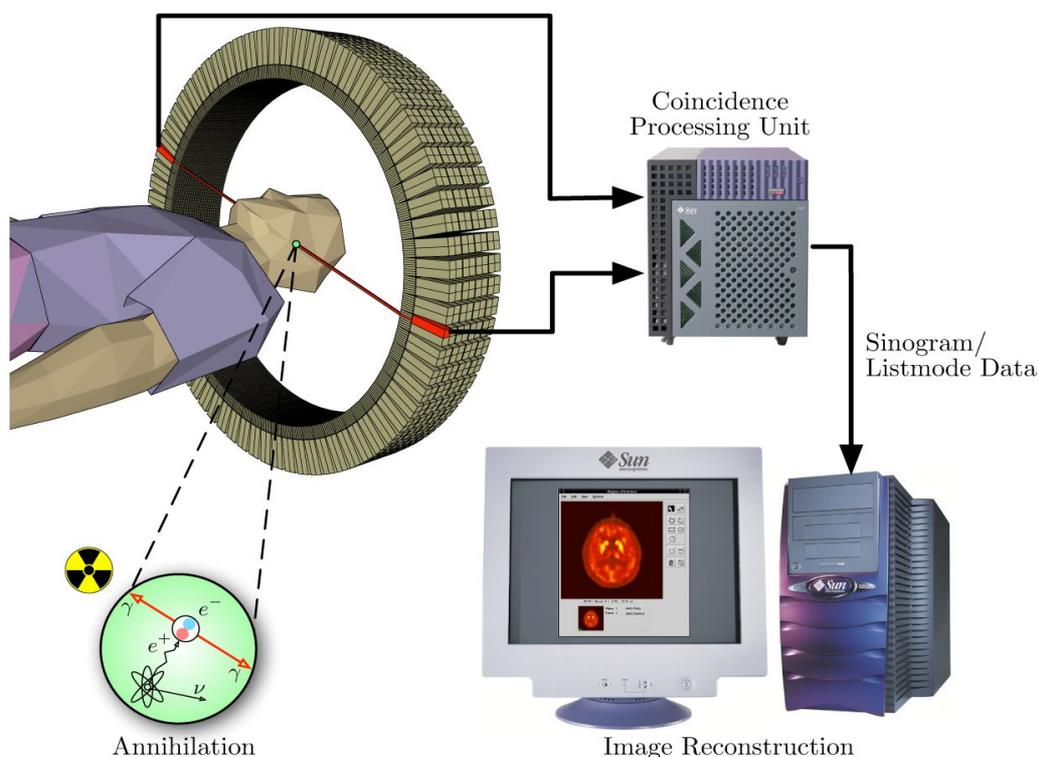
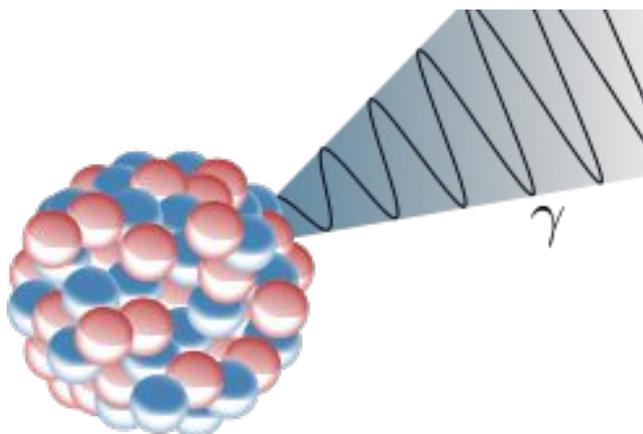


Рисунок 19: Схема работы позитронной томографии. С сайта [22].

⁷ Образование при аннигиляции покоящихся электрона и позитрона именно пары (а не одного) гамма-кванта и разлёт получившихся гамма-квантов в строго противоположных направлениях являются требованиями закона сохранения импульса.

Гамма-излучение.

В случаях, когда распад ядра с вылетом нуклона или альфа-частицы невозможен (запрещён какими-то законами сохранения), энергия возбуждённого состояния ядра может быть понижена испусканием кванта-электромагнитного излучения (гамма-кванта) [23]. Если же процесс распада возможен — он оказывается гораздо более вероятен, так как электромагнитное взаимодействие гораздо слабее сильного.



Гамма-лучи были открыты французским физиком П.Виллардом в 1900 году при изучении испускаемого радием излучения. Виллард обнаружил, что если исключить альфа-частицы, останавливаемые тонким слоем свинца, то в магнитном поле остающиеся «лучи» делятся на две фракции: отклоняющиеся известные к тому моменту бета-частицы и неотклоняющиеся новые лучи. Название «гамма-лучи» было предложено Резерфордом в 1903 году.

Рисунок 20: Гамма-распад (представление художника). С сайта [23].

Времена жизни гамма-активных ядер обычно невелики и составляют $10^{-7} - 10^{-11}$ сек (за небольшим исключением долгоживущих

изомеров). Поэтому большинство лабораторных источников гамма-излучения на самом деле являются долгоживущими бета-активными изотопами, в которых при бета распаде образуются продукты реакции в возбуждённом ядерном состоянии, которые в свою очередь быстро релаксируют с испусканием гамма-квантов. Типичная энергия гамма-квантов от радиоактивного распада простирается от 100кэВ до почти 10МэВ. Верхний предел, как и для альфа или бета-распадов, связан с энергией связи нуклона в ядре. Космические источники гамма-радиации могут иметь энергию кванта до 10ТэВ, но это высокоэнергичное излучение не связано с процессами распада.

Ядерные реакции

Реакция ядерного синтеза.

Рассмотренная ранее реакция альфа-распада происходила в тяжёлых ядрах при условии, что энергия связи в более лёгком ядре гелия-4 (альфа-частице) достаточно выше энергии связи в исходном ядре. На кривой удельной энергии связи есть, однако, и область малых атомных масс, в которой удельная энергия связи растёт с ростом массы. В этой области возможно протекание реакций ядерного синтеза с объединением нескольких лёгких ядер в более тяжёлое. Разница в энергии связи исходных и конечных ядер превратится в кинетическую энергию образующихся ядер. Выход энергии в одной реакции типично измеряется величиной 1-10 МэВ. Для сравнения отметим, что в химических реакциях (например горении), выход энергии определяется перестройкой внешних электронов, то есть имеет порядок энергии ионизации 1-10эВ, что в миллион раз меньше. Это делает реакции синтеза интересным

направлением в развитии энергетики. Также, как известно, реакции синтеза являются источником энергии в звёздах. Мы рассмотрим эти вопросы ниже, а сейчас рассмотрим некоторые физические аспекты осуществления реакции синтеза [24].

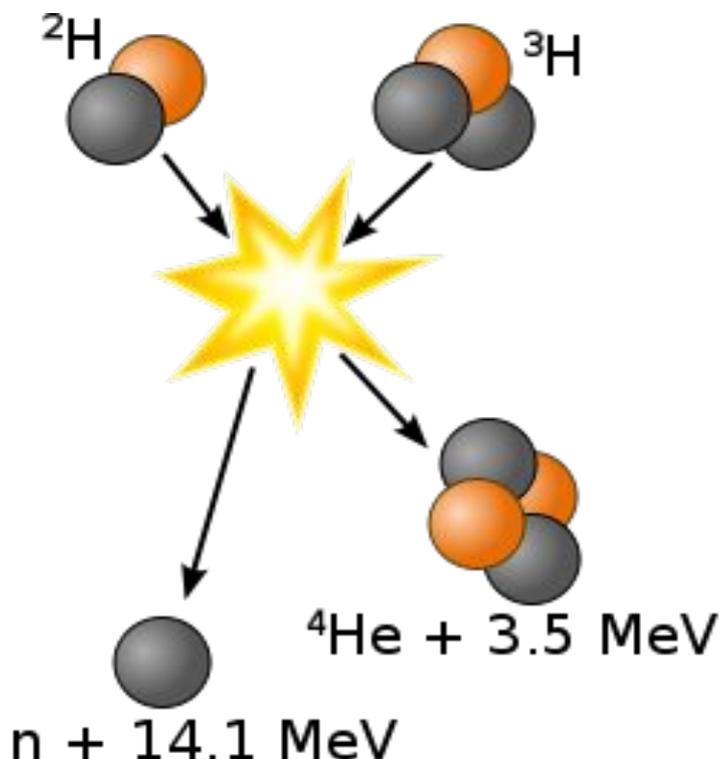


Рисунок 21: Реакция слияния дейтерия и трития в представлении художника. С сайта [24].

Во-первых, подчеркнём сразу, что выделяемая в ходе реакции энергия не является сразу электроэнергией, доступной потребителю. Наоборот, это энергия движущихся частиц, вообще говоря являющихся частью ионизирующего излучения. Так что энергия ядерного синтеза является «экологически чистой» только в некотором смысле: она не оставляет после себя большого количества долгоживущих радиоактивных изотопов (что обычно происходит в реакции деления). Но «работающая» реакция синтеза неизбежно сопровождается образованием энергичных частиц, короткоживущих изотопов, являющихся источником радиационной опасности.

Для прохождения реакции синтеза необходимо, чтобы два ядра сблизилась на достаточно близкое расстояние. Это расстояние определяется радиусом действия ядерных сил и составляет $10^{-14} - 10^{-15}$ метра. Вне радиуса действия ядерных сил на ядра действует кулоновское отталкивание, препятствующее их сближению: на расстоянии 10^{-14} метра кулоновская энергия взаимодействия двух протонов будет на 4 порядка больше внутриатомной и составит около 100 кэВ: $U_{H-H} = k \frac{e^2}{r_n} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2}{10^{-14} \dots 10^{-15}} = 0.15 \dots 1.5 \text{ МэВ}$.

Преодоление этого барьера требует наличия у протона достаточной кинетической энергии, соответствующей температуре порядка 1 миллиарда кельвин и скорости порядка 10000 км/сек. Квантовая механика оставляет возможность туннельного преодоления этого барьера, но это не сильно изменяет нашу оценку.

Соответственно, для успешного проведения реакции синтеза необходимо:

1. Создать достаточную плотность вещества, чтобы процессы столкновения ядер

столкнуться происходили достаточно часто и возникала возможность двум ядрам .

2. Сообщить сталкивающимся ядрам энергию, достаточную для преодоления заметной частью ядер кулоновского барьера. Этого можно добиться либо разгоняя ядра на ускорителе, либо нагревая до достаточно высокой температуры (энергия 1эВ соответствует температуре примерно $10^4 K$, то есть речь идёт о температурах $10^8-10^{10} K$).

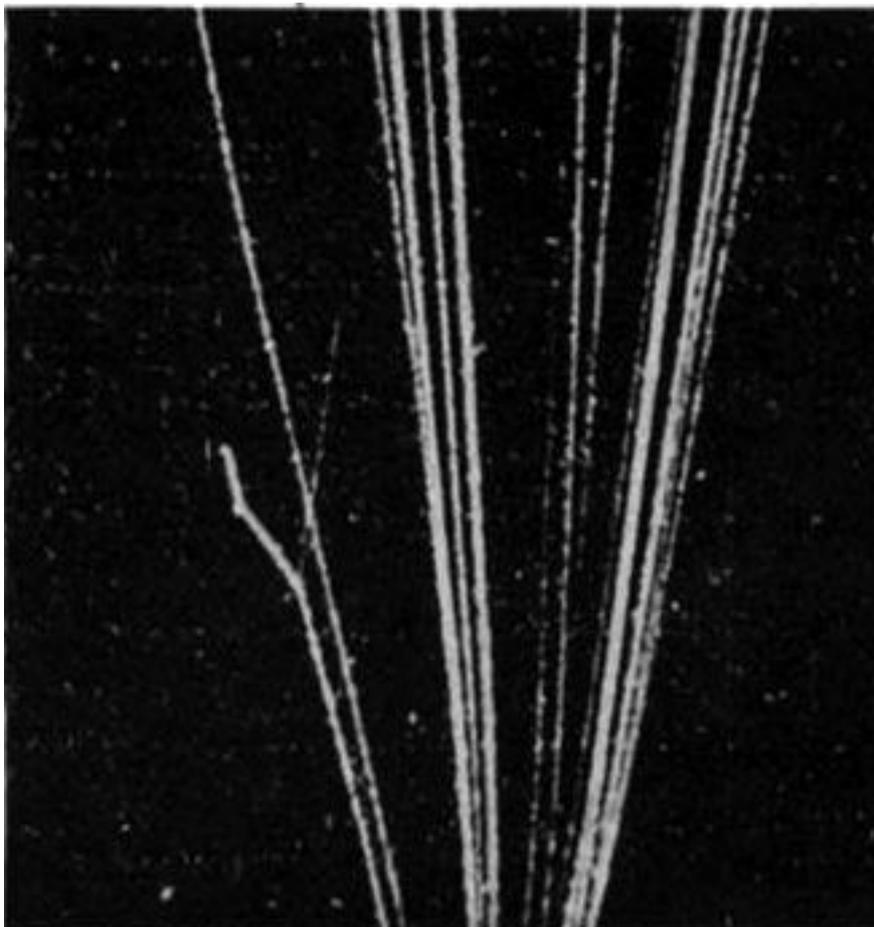


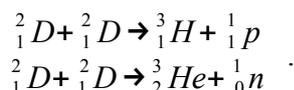
Рисунок 22: Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке. Из работы [25].

Наблюдение первых реакций синтеза связано, как и многое в атомной физике, с именем Резерфорда. В 1917-1919 году Резерфорд и Содди заметили, что при бомбардировке азота альфа-частицами происходит «разрушение» ядра с образованием протона. Отметим, что типичные энергии альфа-частиц в несколько МэВ соответствуют сформулированному выше критерию для возможности проникновения через кулоновский барьер лёгкого ядра. По просьбе Резерфорда, Патрик Блэккет (будущий Нобелевский лауреат 1948 года «за развитие метода камеры Вильсона и за открытия в ядерной физике и физике космических лучей») предпринял поиск следов этих процессов при помощи камеры Вильсона [25]. В течение 1924 года он сделал 23000 фотографий, на которых обнаружилось более 400000 треков частиц, *восемь(!!!)* из которых соответствовали процессу столкновения альфа частицы с атомом азота. По зафиксированному треку (Рисунок 22) видно, что в процессе столкновения альфа-частица исчезает, а возникает протон (тонкий трек уходящий вправо-вверх) и массивное

ядро, а треков, соответствующих образованию электронов не наблюдалось. Происходящая при этом реакция: ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^{17}_8\text{O}$.

В 1928-1934 году в лаборатории Резерфорда Кокрофтом и Валтоном (Нобелевские лауреаты 1951 года «за их пионерскую работу по превращению атомных ядер искусственно ускоренными атомными частицами») был построен высоковольтный генератор, позволяющий ускорять протоны до энергий 100-400 кэВ. При помощи этого генератора Кокрофт и Валтон в 1932 году наблюдали, что при бомбардировке протонами литий-7 распадается на две альфа-частицы: ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow 2\,{}^4_2\text{He}$.

Позднее в 1933-1934 сотрудник Резерфорда Марк Олифант наблюдал [26], [27] образование гелия-3 и трития при слиянии двух дейтронов:



Спонтанное и индуцированное деление ядер.

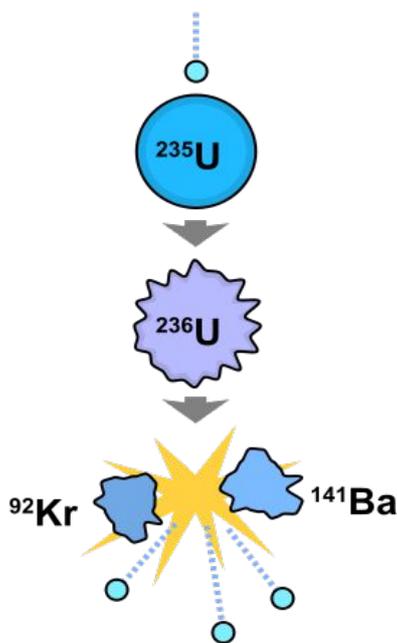


Рисунок 23: Деление урана-235 в представлении художника. сайта [28].

Для тяжёлых ядер энергетически оказывается возможным процесс, когда ядро делится на две, обычно примерно равные, части. Этот процесс называют делением ядер [28]. Такой процесс однако оставался долгое время неизученным, к середине 30-х годов 20 века считалось, что процессы распада ядер сводятся к альфа- и бета-распадам. Процессы слияния ядер, о которых говорилось в предыдущем разделе, были обнаружены раньше, чем процессы деления — это может казаться сейчас немного удивительным, потому что практические применения процессов деления (АЭС и ядерное оружие) широко известны, а вот мирное применение процессов синтеза остаётся во многом гипотетическим.

После открытия нейтрона в 1932 году начались опыты по бомбардировке нейтронами различных мишеней. В частности, итальянский физик Энрико Ферми проводил опыты по облучению тяжёлых элементов нейтронами, по результатам которых он получил в 1938 году Нобелевскую премию «за демонстрацию образования новых радиоактивных

элементов в результате облучения нейтронами и за связанное с этим открытие ядерных реакций вызываемых медленными нейтронами». Ферми трактовал свои результаты как образование под действием поглощения нейтронов более тяжёлых изотопов, которые распадались по обычным каналам альфа- и бета-распадов.

Однако в том же 1938 году группой немецких физиков и химиков под руководством Отто Гана было обнаружено, что при бомбардировке медленными нейтронами ядер урана и тория образуются более лёгкие элементы (в частности, барий из урана). То есть наблюдался процесс вызванного бомбардировкой деления ядра на большие части. Этот результат

требовал пересмотра результатов Ферми, так как часть из предполагаемых трансурановых элементов могла оказаться неправильно посчитанными продуктами распада.

Это открытие произошло перед самым началом Второй мировой войны. Стоит отметить, что все участники этого открытия оказались вовлечены в события, связанные с войной. Один из соавторов Гана, Лиза Майтнер, была вынуждена покинуть Германию, потому что была еврейкой. Отто Ган и Фриц Штрассман остались в Германии. Во время войны Ган продолжал в Германии исследования по распаду урана, но не участвовал в практической военной атомной программе Германии. В 1945 году он вместе с другими немецкими физиками (в том числе М. фон Лауэ, В.Гейзенберг, К. фон Вайцзекер) был интернирован в Великобританию. В 1945 году Отто Гану была присуждена Нобелевская премия по химии за 1944 год (в 1944 году премия не вручалась) «за открытие распада тяжёлых ядер». Однако, в 1945 году он не смог участвовать в Нобелевской церемонии. По некоторым сведениям, его просто не выпустили из места, где он был интернирован. Отто Ган получил свою Нобелевскую премию в 1946 году. После войны Ган вернулся в Германию, где долгое время возглавлял Общество Макса Планка — одну из организационных форм немецкой не-университетской фундаментальной науки. В честь Отто Гана было названо немецкое (ФРГ) торговое судно с атомной силовой установкой («Отто Ган», построен в 1964, в эксплуатации с атомной силовой установкой с 1968 по 1979, далее переоборудовано в дизель-электроход (1979), в 1983 переименовано, в 2009 разрезано на металлолом).

Помимо индуцированного распада оказалось возможным и спонтанное деление ядер урана, открытое в 1940 году советскими учёными Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком. Период полураспада спонтанного деления урана-238 составляет $8 \cdot 10^{15}$ лет. Последующие опыты показали, что спонтанное деление демонстрируют все ядра тяжелее тория, а период полураспада обычно уменьшается по мере перехода к более тяжёлым ядрам.

Деление ядер может быть качественно объяснено в «капельной» модели ядра (рисунок 24). Если форма ядра отклоняется от сферической (после поглощения нейтрона или спонтанно), то возникает конкуренция нескольких вкладов в энергию. С одной стороны, «поверхностное натяжение» энергия стремится вернуть форму ядра к сферической. С другой стороны, при перераспределении одноимённо заряженных протонов может возникнуть ситуация, когда кулоновское отталкивание окажется сильнее «поверхностного натяжения». Тогда происходит разрыв на две разлетающиеся «капли» меньшего размера. Помимо двух основных осколков могут образовываться и более мелкие частицы (лёгкие ядра). Кроме того, получившиеся осколки ядра неизбежно оказываются перегружены нейтронами по сравнению со стабильными изотопами соответствующих элементов, так как среднее количество нейтронов на протон растёт с ростом массы ядра. Поэтому продукты деления ядра должны быть либо бета-активными (конвертировать нейтроны в протоны), либо испускать излишние нейтроны. На одно деление ядра урана-235 или плутония-239 обычно испускается 2.5-3 нейтрона. Образовавшиеся нейтроны могут вызывать деление других ядер, при котором образуются новые нейтроны, что приводит к возникновению цепной реакции (рисунок 25) [29].

Наконец, оценим какой порядок выделения энергии на один акт деления ядра. Обычно делятся ядра с атомным числом около 200, получаются элементы с массовым числом около 100. Отличие удельной энергии связи в этих ядрах составляет около 0.5-1.0МэВ. Соответственно, выделение энергии на одно деление ядра составляет 100-200МэВ. Как и в случае синтеза, эта энергия в миллионы раз больше характерной энергии химической связи.

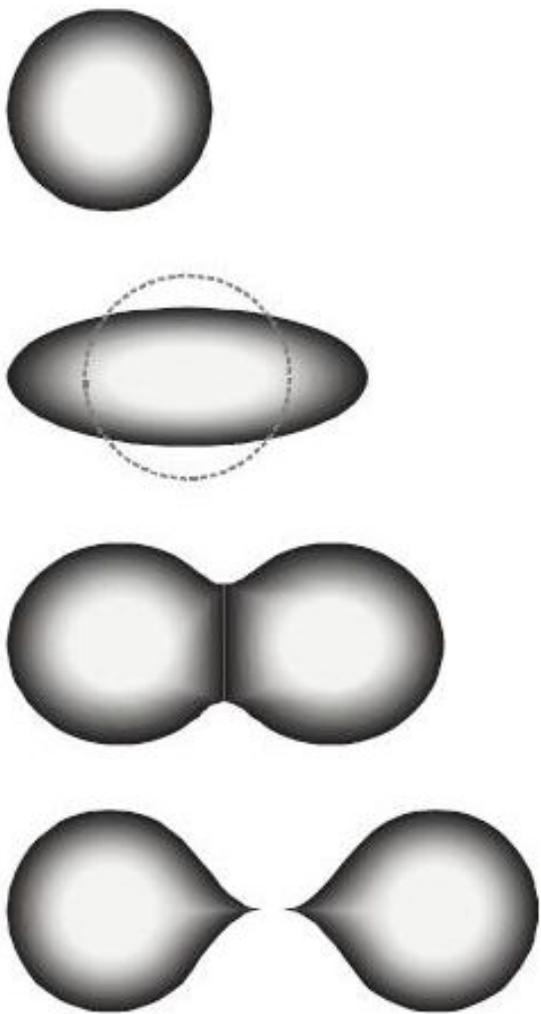


Рисунок 24: Деление в капельной модели. С сайта [28].

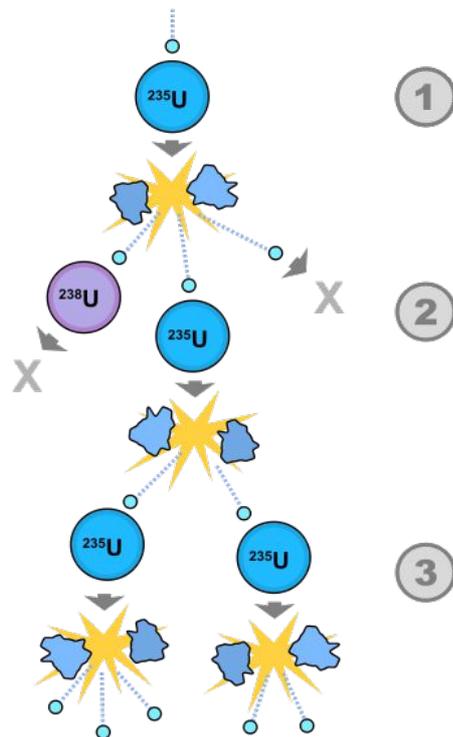


Рисунок 25: Цепная реакция деления урана-235. Стадия 1 - исходный атом поглощает нейтрон и делится с образованием трёх нейтронов. Стадия 2 - один из нейтронов поглощается ядром урана-238 без деления, один покидает активную зону, а один вызывает следующее деление. Стадия 3 - образовавшиеся при делении урана-235 на второй стадии нейтроны вызывают деление новых ядер урана-235. С сайта [29].

Реакции синтеза в звёздах.

Рассмотрение примеров ядерных реакций в природе начнём с реакций синтеза, происходящих в недрах звёзд. В этом изложении мы лишь поверхностно касаемся тем, являющихся предметом более подробного изучения в курсе астрономии (например, [31], [32], [33]). Поверхность звёзд обычно имеет температуру в 1000-10000К, эта температура определяет наблюдаемый цвет звезды. Однако в глубине звезды из за гравитационного сжатия температура может достигать миллионов и десятков миллионов градусов, а плотность сотен тысяч $\text{кг}/\text{м}^3$, то есть достигать значений необходимых для преодоления кулоновского барьера и для запуска реакции синтеза. Эта горячая и плотная область называется ядром звезды. Для Солнца размер ядра составляет около 20-25% радиуса [30].

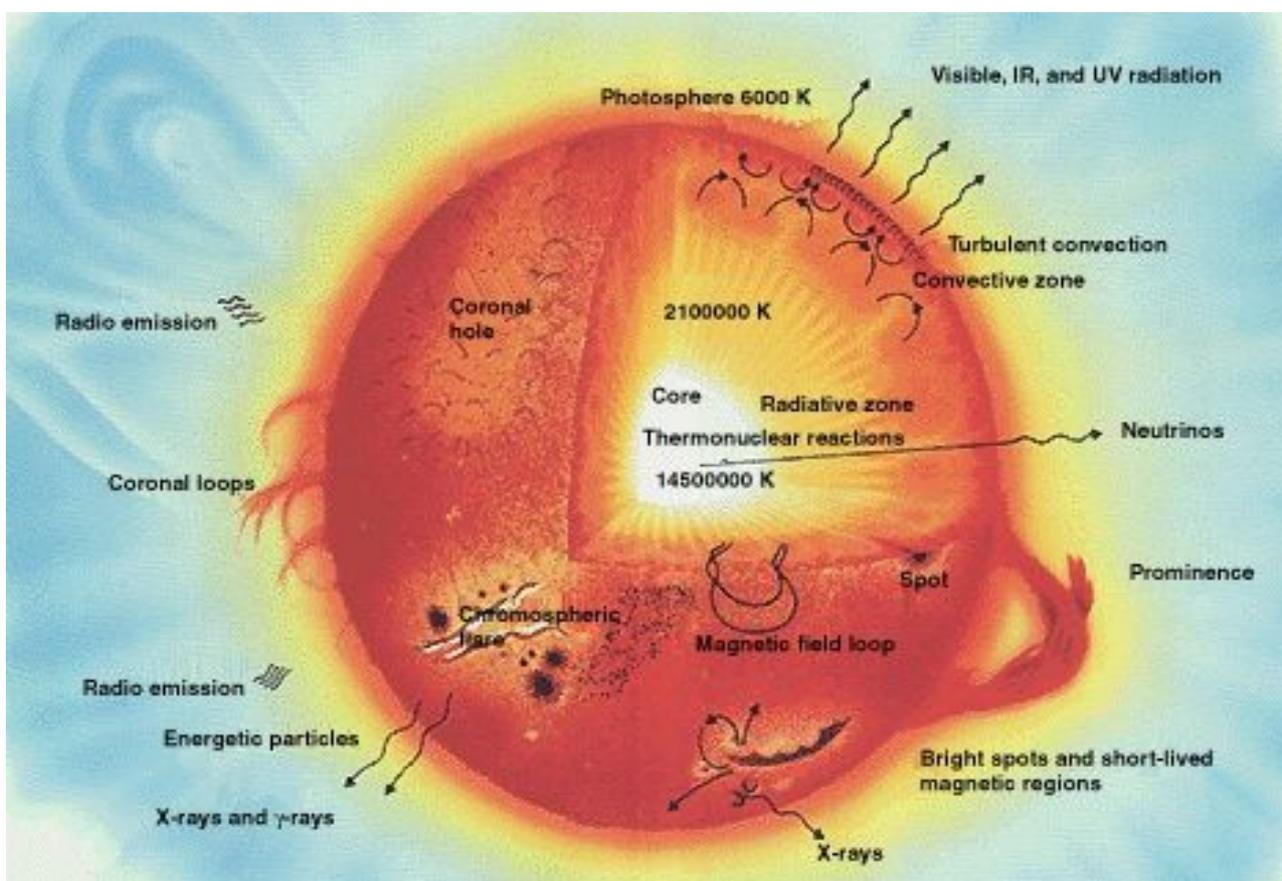


Рисунок 26: Структура Солнца. С сайта [30].

Реакции ядерного синтеза в звёздах являются источником всех элементов во Вселенной: по современным представлениям после Большого Взрыва во Вселенной были только водород и небольшое количество гелия. Образование более тяжёлых элементов происходит только в ходе эволюции звёзд. За теоретическое описание реакций синтеза в звёздах была присуждена Нобелевская премия 1967 года Х.Бете, «за его вклад в теорию ядерных реакций, в особенности за его открытия, связанные с производством энергии в звёздах».

Рассмотрим эти реакции чуть подробнее. Для Солнца, являющегося звездой небольшой массы, находящейся в середине своего эволюционного пути, наиболее важным является набор реакций водородного горения.

Основная реакция в ядре Солнца — это протон-протонная цепочка реакций (рисунок 27) [34].

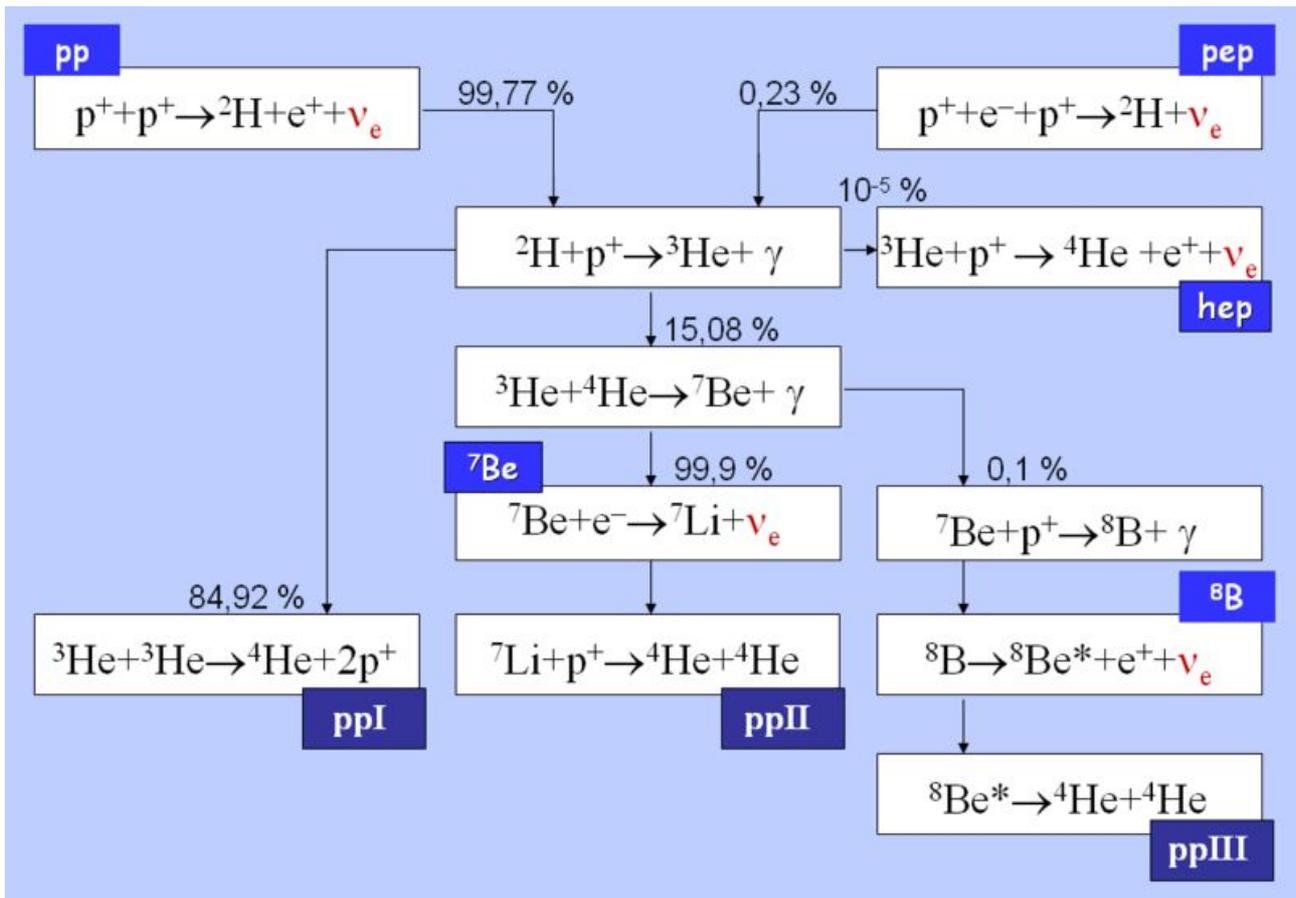
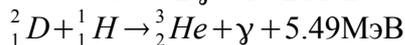
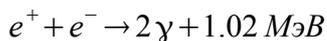
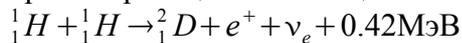
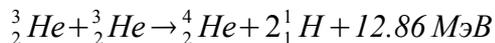


Рисунок 27: Схема ветвей протон-протонной цепочки термоядерных реакций. С сайта [34].
 Первыми реакциями этой цепочки является синтез дейтерия и гелия-3:

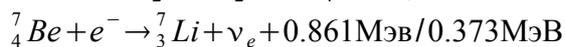
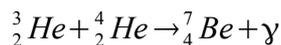


Далее возможно несколько путей дальнейших реакций, зависящие от температуры ядра звезды.

ppI ветвь (на Солнце основная, происходит с вероятностью 85-86%, доминирует при температурах 10-14 миллионов градусов):



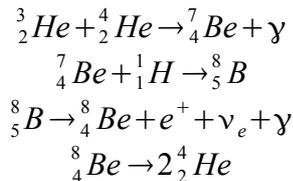
ppII ветвь (на Солнце происходит с вероятностью 14-15%, является доминирующей реакцией при температурах 14-23 миллиона градусов):



на втором этапе этой реакции энергия нейтрино зависит от получившегося состоянии ядра лития-7, в 90% случаев энергия нейтрино равна 0.861МэВ.

ppIII ветвь (на Солнце происходит с вероятностью 0.11%, но важна как источник энергетичных нейтрино, становится доминирующей при температуре выше 23 миллионов

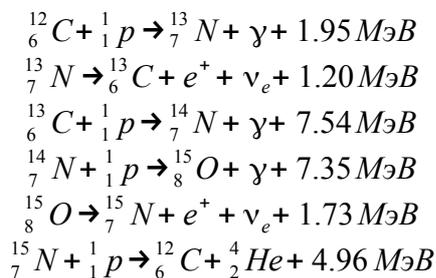
градусов):



энергия нейтрино на предпоследнем этапе может достигать 14.06МэВ.

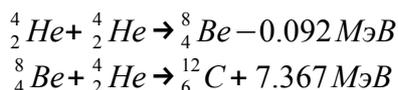
В основной ppI ветви из 4 протонов получается одно ядро атома гелия, дефицит массы составляет 0.7%, полный выход этой реакции 26.73МэВ. Нейтрино уносит 2% этой энергии, остальная энергия выделяется в виде гамма-квантов, давление которых противодействует гравитационному сжатию. В ветвях ppII и ppIII нейтрино уносит 4% и 28% энергии. Наблюдение нейтрино (которые возникают при превращении протона в нейтрон в разных бета-процессах) является прямым доказательством прохождения на Солнце реакций синтеза. Подробности о работе нейтринных обсерваторий могут быть найдены в [31] и других специализированных источниках. Распределение нейтрино по энергиям позволяет определить соотношение между различными ветвями протон-протонной цепочки и таким образом получить информацию о температуре ядра.

Альтернативной схемой водородного горения⁸, реализующейся в звёздах массой более 1.3 солнечной, является каталитический CNO-цикл. Есть несколько вариантов этого цикла, рассмотрим простейший из них, также называемый циклом Бете-Вайцзекера, в честь предложивших его физиков. Реакции этого цикла:



таким образом, в цикле из 6 реакций поглощается 4 протона и нарабатывается одна альфа-частица, ядро углерода-12 выступает «катализатором» этой реакции, возобновляясь к концу цикла. Нейтрино уносят около 5% энергии в этом цикле.

Протон-протонная цепочка и CNO-цикл, таким образом, перерабатывает водород в ядре звезды в гелий. На дальнейших этапах развития звезды в достаточно тяжёлых звёздах могут достигаться давления и температуры достаточные для запуска реакций синтеза более тяжёлых элементов. В первую очередь, это тройной альфа-процесс, в котором образуется углерод-12:



промежуточный изотоп бериллий-8 неустойчив (период полураспада 10^{-16} сек, распад на две альфа-частицы), но в условиях высокой плотности ядра звезды он успевае́т

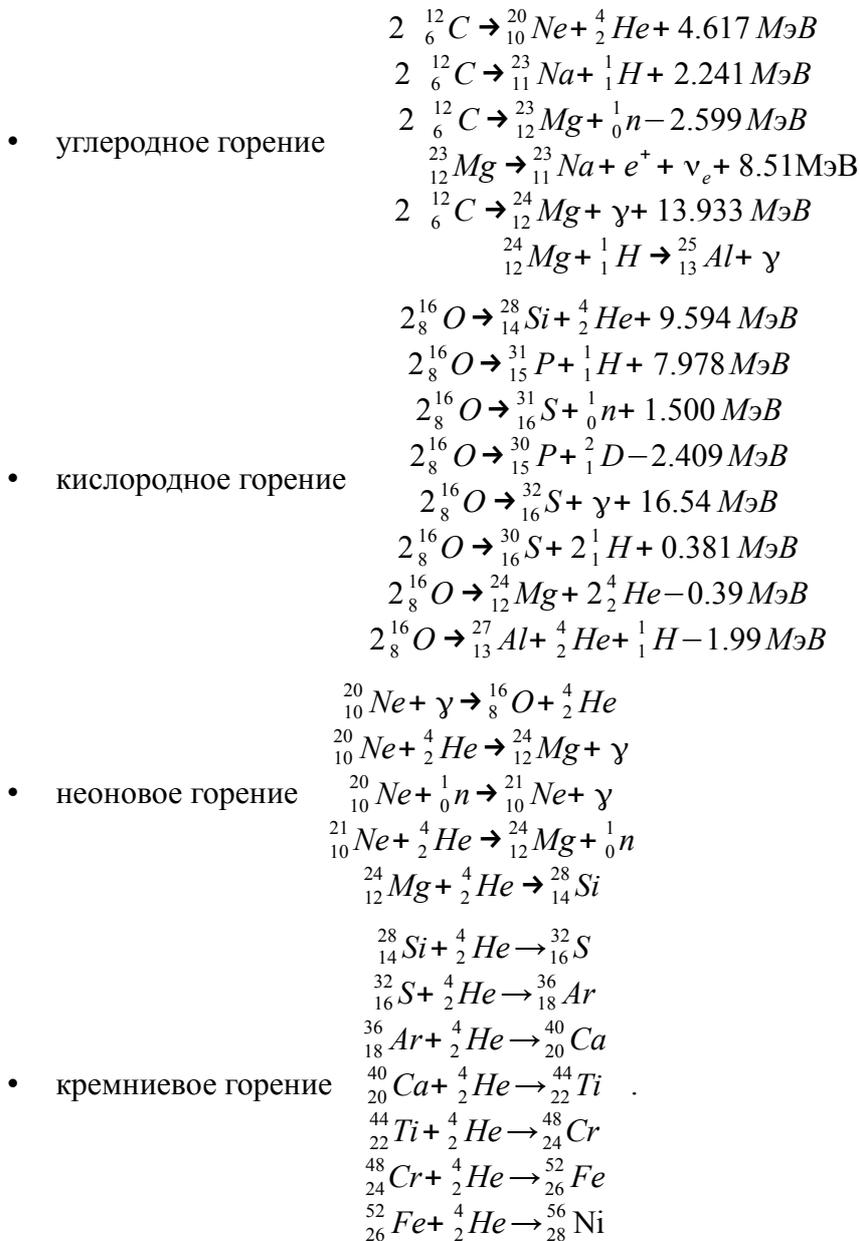
⁸ Под «горением» здесь подразумевается ряд реакций, в которых расходуются («перерабатываются» или «выгорают») протоны и формируются более тяжёлые ядра. В аналогичном смысле слово «горение» используется далее при описании реакций с более тяжёлыми ядрами (углеродное горение и так далее).

провазимодействовать с альфа-частицей. Здесь же возможны реакции образования кислорода-16:



дальнейшие захваты альфа-частиц приводят к образованию неона-20, магния-24. Совокупность этих реакций называется альфа-процессами.

С израсходованием гелия становятся возможными реакции горения углерода, кислорода, неона, кремния. Эти реакции могут проходить только в достаточно тяжёлых звёздах, так как условия преодоления кулоновского барьера становится всё более жёсткими, а гравитационное сжатие является единственным способом повышения плотности и температуры в ядре. Приведём здесь для сведения основные реакции этих этапов:

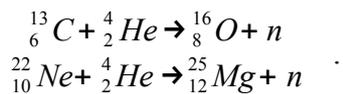


Конечным продуктом кремниевого горения является никель-56, который через цепочку распадов (${}^{56}_{28}Ni \rightarrow (6 \text{ дней}) \rightarrow {}^{56}_{27}Co + e^+$, ${}^{56}_{27}Co + e \rightarrow (77 \text{ дней}) \rightarrow {}^{56}_{26}Fe$) преобразуется в

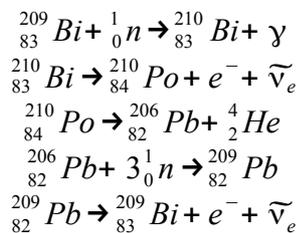
железо-56. Дальнейший термоядерный синтез невозможен: для прохождения синтеза необходимо выделение энергии, а дальнейшее увеличение массы атома требует затрат энергии.

Таким образом, при завершении кремниевого цикла прекращается выработка энергии в ядре звезды. Так как радиационное давление в звёздах компенсируется гравитационным сжатием, то при остановке термоядерных реакций происходит быстрое сжатие ядра до состояния нейтронной звезды и следующее за этим гравитационное сжатие внешних слоёв звезды, разгоняющихся до релятивистских скоростей. Удар внешних оболочек звезды о практически несжимаемое ядро приводит к выделению энергии, отразившись от ядра содержимое внешних слоёв разлетается, открывая горячее ядро — происходит вспышка сверхновой. Большая скорость сталкивающихся в этот момент ядер и большая интенсивность потоков элементарных частиц позволяют осуществить синтез более тяжёлых элементов.

Основным способом наработки тяжёлых элементов при этом является так называемый r-процесс: быстрый захват ядром нейтронов, опережающий скорости бета-распада. В r-процессе образуются самые тяжёлые из природных элементов, в частности уран и трансурановые элементы. Другим способом получения тяжёлых элементов является механизм медленного захвата нейтронов в s-процессе. Нейтроны рождаются в звёздах в некоторых реакциях, например:



Другие ядра могут захватывать эти нейтроны образуя стабильные или нестабильные изотопы. Нестабильные изотопы могут распадаться по бета-процессу, увеличивая заряд ядра. Новое ядро продолжает захватывать нейтроны и так далее. S-процесс ограничивается стабильными висмутом-209:



Совокупность всех этих реакций (звёздный нуклеосинтез) позволяет описать наблюдаемое во Вселенной распределение элементов.

Реакции распада и спонтанного деления в природе.

Реакции распада и спонтанного деления в природе также приводят к образованию некоторых элементов и изотопов, перераспределению содержания изотопов по сравнению с результатами звёздного нуклеосинтеза. В частности, гелий на Земле образуется как продукт альфа-распада в горных породах. Также различные реакции распада изотопов в земной коре по некоторым оценкам дают более половины тепла, выделяемого Землёй.

Из примечательных примеров можно отметить также образование радона. Инертный газ радон образуется в цепочке распада урана (рисунок 28) [35] и постоянно выделяется из почвы, что приводит к его накоплению в непроветриваемых и подвальных помещениях (радон тяжелее воздуха). Также радон может накапливаться в грунтовых водах (особенно



Рисунок 29: Слева: фотография остатков одного из природных реакторов в Окло (реактор 15). Жёлтые горные породы содержат оксид урана. С сайта [36]. Справа: схема расположения природных реакторов в Окло. (1) — зоны реакторов, (2) — песчаник, (3) — слой урановой руды, (4) — гранит. С сайта [37].

Возможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции связана с уникальным сочетанием природных и геологических условий в Окло. Уранит UO_2 формирует в мягком песчанике линзы диаметром до 10 метров и толщиной до 1 метра. Проникающая в песчаник вода выступала замедлителем нейтронов. Обнаружено около 16 мест в этом месторождении, в которых шла цепная реакция. Выделяемая тепловая мощность составляла около 100 кВт. Реакция началась около 2 миллионов лет назад и проходила несколько сотен тысяч лет.

Изотопная датировка.

Прежде чем начать обсуждать основные методы изотопной датировки, хотелось бы отметить посвящённую этому вопросу популярную книгу К.Терни «Кости, скалы и звёзды. Наука о том, что произошло» [38].

Радиоуглеродный анализ.

Радиоуглеродный метод датировки был разработан американским учёным Виллардом Либби в конце 40-х годов двадцатого века [39]. За это открытие В.Либби был удостоен Нобелевской премии по химии 1960 года.

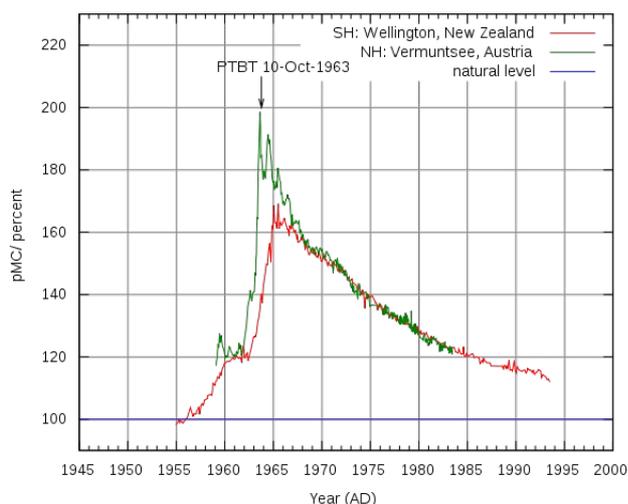


Рисунок 31: Масс-спектрометр, используемый для радиоуглеродного анализа. С сайта [39].

Рисунок 30: Изменение уровня углерода-14 в атмосфере в результате ядерных испытаний. Отметка PTBT (Partial Nuclear test Ban Treaty) - подписание Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой. Красная кривая — наблюдение в лаборатории в Новой Зеландии, зелёная — в Австрии, синяя — природный уровень. С сайта [39].

В основе метода лежат следующие физические соображения.

1. У углерода есть три природных изотопа⁹: углерод-12 (98.9%), углерод-13 (1.1%) и углерод-14, присутствующий в малом количестве $\approx 10^{-7}\%$ (). Изотопы ^{12}C и ^{13}C – стабильны, углерод-14 распадается электронным бета-распадом в азот-14 с периодом полураспада 5730 лет. В природе изотоп углерода-14 образуется в верхних слоях атмосферы благодаря захвату азотом вторичных нейтронов, образующихся при попадании частиц космического излучения в атмосферу: ${}^1_0n + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1p$.
2. Скорость образования углерода-14 примерно постоянна. В среднем образуется по естественным причинам около 7.5 кг углерода-14 в год, а его общее естественное содержание в атмосфере оценивается в 75 тонн.
3. Углерод (оксид углерода) участвует в круговороте элементов, поглощается живыми организмами с дыханием, откладывается в живых тканях. В живом организме за счёт действующего обмена веществ поддерживается постоянно концентрация углерода-14, равная природной концентрации в атмосфере.

Таким образом, если по окончании жизнедеятельности образец живого происхождения был изолирован от окружающей среды (например, погребён в плотных глинистых породах), то по измерению концентрации углерода-14 по сравнению с углеродом-12, можно вычислить

⁹ Также лабораторно синтезированы изотопы с массами от 8 до 22, самый долгоживущий из этих изотопов углерод-11 имеет время жизни около 20 минут. Углерод-11 используется как один из вариантов бета-активного ядра-метки для маркирования молекул при позитронной эмиссионной томографии (см. стр. 22).

возраст образования исследуемого образца: $\frac{N_{14}}{N_{12}} = \left(\frac{N_{14}}{N_{12}} \right)_{t=0} 2^{-t/T_{1/2}}$. Здесь N_{14} и N_{12} – количество атомов углерода в момент проведения анализа, $\left(\frac{N_{14}}{N_{12}} \right)_{t=0}$ – концентрация углерода-14 в момент изоляции образца, $T_{1/2}$ — период полураспада.

Нарушение сделанных предположений вносит погрешность в метод датировки. Интересно отметить, что с началом промышленной революции в 19 веке началось активное сжигание ископаемого топлива, не содержащего практически углерода-14, что привело к смещению изотопного баланса в сторону от равновесного. Ядерные испытания середины 20 века привели к образованию количества углерода-14, сравнимого с естественным (рисунок 30). Эти рукотворные факторы приводят к тому, что метод радиоуглеродного анализа применим к образцам, полученным в последние 100-200 лет, только с оговорками. В то же время, исследование перемещения произведённого при ядерных испытаниях углерода-14 позволило лучше понять, как перемешивается и связывается углерод — то есть получить дополнительную проверку и калибровку метода. Также не совсем постоянна во времени солнечная активность, что приводит к некоторому изменению скорости образования углерода-14.

Эти факторы, однако, не делают метод неприменимым — они просто требуют дополнительной калибровки. Эта калибровка делается другими археологическими методами. Одна из наиболее подробных калибровочных шкал получена методом дендрохронологии [38], [40], [41]. Этот метод основан на том, что из-за особенностей климата скорость роста деревьев (толщина годовых колец) непостоянна: в холодный год толщина годового кольца меньше, в тёплый — больше. В результате на срезе дерева при аккуратном измерении возникает некоторое чередование толщин годовых колец, отражающее климатические особенности данной местности. Тогда, если мы возьмём живущее сейчас дерево долгожитель возрастом, для примера, 200 лет и построим для него такой график толщин годовых колец, а потом возьмём образец бревна, использовавшегося в строительстве дома 150 лет назад (и спиленного 150 лет назад в возрасте тех же примерно 200 лет), построим тот же график для него и обнаружим, что вид графиков в первые 40 лет жизни «современного» дерева для двух образцов совпадает, то мы можем продолжить нашу шкалу чередования толщин годовых слоёв примерно на 350 лет в прошлое (рисунок 32). Продолжая это исследование на разных археологических образцах можно построить дендрохронологическую шкалу примерно на 11000 лет назад. С учётом аналогичного анализа морских отложений и роста кораллов калибровочная шкала построена примерно на 25000 лет в прошлое. Эта шкала позволяет откалибровать метод радиоуглеродного датирования и применять его с достаточной надёжностью к образцам живого происхождения.

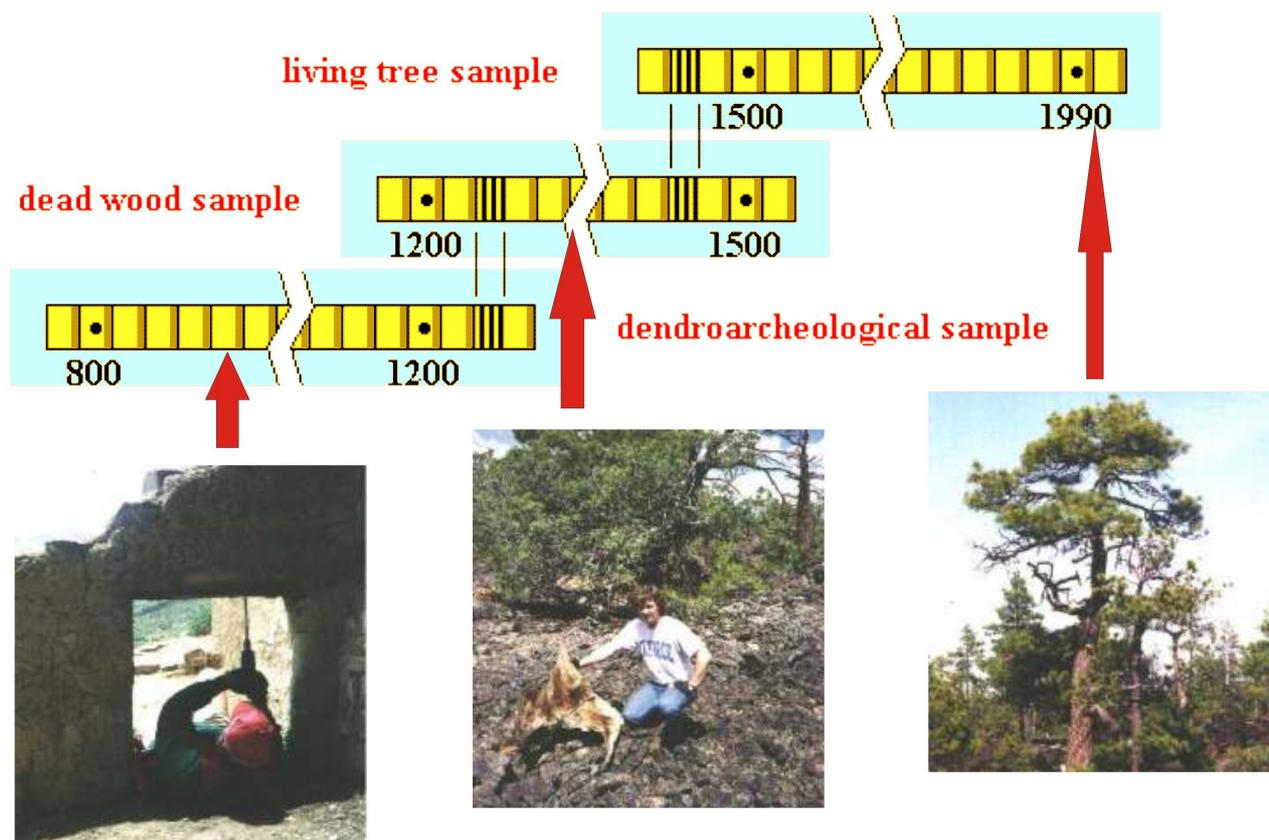


Рисунок 32: Принцип построения дендрохронологической шкалы времени. Сверху: схема годовых колец в трёх образцах живого дерева, найденного при раскопках фрагмента дерева и извлечённого из древней постройки фрагмента. С сайта [41].

Радиоуглеродная датировка позволяет достаточно надёжно датировать образцы возрастом от 100-200 лет и до 60-70 тысяч лет в прошлое. Верхний предел связан, в основном с относительно малым (на этом масштабе) периодом полураспада: за 60000 лет проходит около 10 периодов полураспада, то есть концентрация углерода-14 уменьшается в $2^{10} \approx 1000$ раз, при том, что и исходная концентрация была ничтожна.

Измерение количества углерода-14 производится по активности бета-распадов (образец либо сжигается до образования газа CO_2 , который помещается в камеру детектора, либо растворяется в сцинтиллирующей жидкости) или по масс-спектрометрии, непосредственно измеряющей количество атомов углерода (рисунок 31).

Одним из известных примеров применения этого метода является проведённая в 1988 году датировка Туринской плащаницы [38], [42], указывающую на возраст ткани около 700 лет (то есть, ткань соткана из материала, «умерщвлённого» примерно в 1300 году н.э.).

Изотопная датировка в геофизике.

Радиоуглеродный анализ применяется на «исторических» масштабах времён в тысячи, максимум десятки тысяч лет. Для задач геофизики интересны гораздо большие времена: миллионы и даже миллиарды лет. Достаточно типичной задачей датировки является вопрос об определении времени формирования некоторых горных пород.

Для этого в геофизике также используются методы изотопной датировки, основанные на

использовании более долгоживущих изотопов. Основной физической принцип остаётся тем же, что и для радиоуглеродного анализа: необходимо найти связанные распадом изотопы. Тогда по их относительной концентрации можно вычислить сколько образовалось или сколько распалось ядер с момента формирования исследуемой горной породы. При изучении геологических масштабов времени может показаться, что становится невозможным узнать исходное количество изотопов. Однако на самом деле принципиально важным оказывается только достаточно легко выполнимое требование, чтобы исследуемая порода оказывалась изолированной с момента своего формирования — что для твёрдых пород выполняется почти автоматически. Мы рассмотрим здесь только основную идею метода, более подробные сведения о методах анализа могут быть найдены в книге К.Терни [38], на странице Геологического факультета МГУ (курс лекций Ю.А.Костицына) [43] и в других источниках [44].

Простейшим вариантом такого анализа является накопление в структуре минерала инертного газа, являющегося продуктом ядерной реакции. Первые опыты такого типа поставил в начале 20 века Резерфорд. В урансодержащем минерале как продукт альфа-распадов в цепи распада урана накапливается гелий. Этот гелий можно выделить прокаливанием минерала. Так как растворимость газа гелия в горячей магме можно считать равной нулю, то можно считать, что весь этот газ образовался в результате распадов. В цепочке распада урана возможны многочисленные реакции, что делает строгий анализ запутанным. Будем для упрощения считать, что из одного ядра урана в ходе всех реакций получается ν альфа-частиц и во всей цепочке распадов есть одно из времён полураспада $T_{1/2}$ гораздо больше остальных (и тогда все остальные распады можно считать мгновенными)¹⁰. Тогда, если в образце обнаружено N_{He} атомов гелия и N_U нераспавшихся атомов урана, то изначально в образце было $N_U^{(0)} = N_U + N_{He}/\nu$ атомов урана. Тогда по уравнению распада можно найти возраст породы:

$$N_U = N_U^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

$$2^{t/T_{1/2}} = 1 + \frac{N_{He}}{\nu N_U}$$

$$t = T_{1/2} \log_2 \left(1 + \frac{N_{He}}{\nu N_U} \right)$$

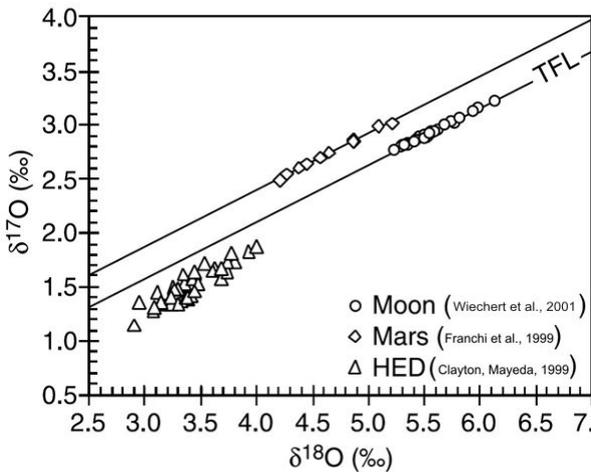
Резерфорд в 1907 году измерил количество накопившегося в образце минерала торанита гелия и остающегося в нём урана и получил, что возраст этого минерала не менее 500 миллионов лет.

В настоящее время широко применяют калий-аргоновый метод, работающий по этому же принципу, но более точный. Калий-40 (около 0.01% в природе) с периодом полураспада 1.248 млрд. лет распадается в кальций-40 (вероятность 89%) или аргон-40 (вероятность 11%). Аргон, будучи инертным газом сохраняется в несвязанном виде, а большой по сравнению с гелием размер атома аргона не позволяет ему покинуть решётку минерала. Метод калий-аргоновой датировки был применён в 2013 году марсоходом «Курьёзити» для оценки возраста минералов на поверхности Марса [45]. Датировка показала возраст породы от 3.86 до 4.56 млрд. лет.

Другой метод изотопной датировки в геофизике использует распады, при которых образуется

¹⁰ Для наиболее распространённого изотопа урана ^{238}U в цепи распадов до ^{206}Pb образуется 8 альфа-частиц, период полураспада урана-238 в торий-234 составляет 4.5 млрд. лет и является самым большим во всей цепочке.

«негазообразный» продукт: распространёнными парами изотопов являются рубидий-стронций и самарий-неодимовые пары. Рубидий-87 распадается в стронций-87 электронным бета распадом с периодом полураспада 48.81 млрд. лет, а самарий-147 распадается в неодим-143 альфа-распадом с периодом полураспада 106 млрд. лет. Для определённости рассмотрим пример рубидий-стронциевой датировки.



Сначала необходимо сделать несколько оговорок про химические свойства изотопов и про особенности формирования твёрдых пород из расплавов. Несмотря на близость химических свойств изотопов, химическая кинетика и термодинамика изотопов различна, поэтому при формировании пород в несколько различных условиях распределение изотопов в различных образцах с одним химическим составом будет отличаться (так называемое фракционирование изотопов). Это, в частности, позволяет определять происхождение разных образцов в геофизике и астрофизике (рисунок 33). Этот эффект наиболее силён для лёгких элементов, где массы изотопов заметно различаются.

Рисунок 33: Содержание изотопов кислорода в метеоритах разного происхождения. Кружки — лунные метеориты, ромбы — метеориты марсианского происхождения, треугольники — метеориты класса HED, предположительно осколки астероида Веста. Из лекций [43], по работе Wiechert et al., Science v.294 p.345

При формировании из расплавленной магмы горной породы кристаллизация также происходит не одновременно для всех соединений: происходит так называемое кристаллизационное фракционирование. Какие-то соединения кристаллизуются раньше, в результате в жидкой магме за время кристаллизации меняется химический состав.

Известны случаи, когда при кристаллизации расплава относительная концентрация компонент смеси в расплаве менялась в 10 раз. Подчеркнём, что в геофизике речь идёт обычно о десятках и сотнях миллионов, а иногда и о миллиардах лет, поэтому промежуток формирования пород в тысячи, десятки тысяч и даже в миллион лет является небольшим в этом масштабе.

Принцип рубидий-стронциевой датировки основан на измерении концентрации изотопов ^{87}Rb , ^{87}Sr и ^{86}Sr в серии образцов горных пород из одной формации. Рубидий и стронций — это щелочной (Rb) и редкоземельный (Sr) элементы, они входят в качестве примесей во многие распространённые породы, содержащие калий и кальций (например, полевые шпаты). В момент формирования в состав некоторых пород входят в неизвестном нам априори количестве радиоактивный рубидий-87, некоторое количество стронция-87 и некоторое количество стронция-86. Стабильный изотоп стронций-87 является продуктом распада рубидия-87 с периодом полураспада 48.81 млрд. лет, стронций-86 не участвует в цепочках распадов и количество его атомов не меняется. Поэтому со временем концентрация рубидия-87 уменьшается, концентрация стронция-87 увеличивается. Для тяжёлых элементов эффект химического фракционирования изотопов слаб, а вот кристаллизационное фракционирование в паре рубидий-стронций проявляется сильно (рубидий «предпочитает» оставаться в жидкой магме дольше, чем стронций). Это позволяет считать, что в момент формирования породы отношение концентраций изотопов стронция было постоянно по всему объёму пород. В то

же время, если мы возьмём образцы из нескольких точек данного массива горной породы, сформировавшегося *геологически* одновременно, то может оказаться, что в момент затвердевания этих участков породы отношение концентраций рубидия и стронция в них отличалось.

Для количества стронция-87 в нашем образце в момент измерения из закона радиоактивного распада имеем

$^{87}\text{Sr} = ^{87}\text{Sr}^{(0)} + ^{87}\text{Rb}^{(0)}(1 - 2^{-t/T_{1/2}})$, здесь химический символ обозначает число атомов соответствующего изотопа, верхний индекс «ноль» означает (неизвестное нам!) количество соответствующих атомов в момент затвердевания образца.

Для количества рубидия-87 имеем:

$$^{87}\text{Rb} = ^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

Нормируя на неизменное количество атомов стронция-86 получаем:

$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)^{(0)} + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}(2^{t/T_{1/2}} - 1)$$

Отношение концентраций изотопов стронция в левой части равенства и отношение концентраций рубидия и стронция — это величины измеряемые сейчас. Отношение концентраций изотопов стронция в момент формирования породы неизвестно, но по предположению постоянно внутри массива. Период полураспада известен. Таким образом, если по серии образцов отношения $\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$ и $\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$ окажутся линейно связаны, то наши предположения подтвердятся и наклон этой прямой (называемой *изохроной*) даст возраст формирования породы (рисунок 34).

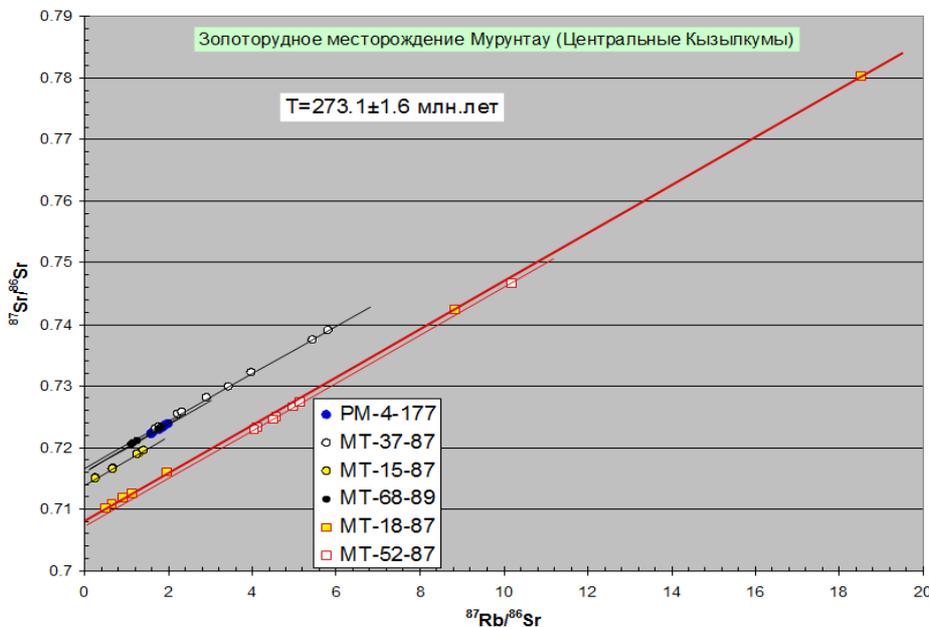


Рисунок 34: Изотопный анализ (Rb-Sr) проб золоторудного месторождения Мурунтау. Определённый возраст 273.1 млн.лет. Точки полученные на разных сериях образцов ложатся на семейство параллельных прямых с одним наклоном. Из лекций Ю.А.Костицына [43].

Изотопная датировка является одним из главных источников нашего знания о возрасте Земли, Луны и Солнечной системы. Данные полученные различными методами (рисунки 35, 36, 37) указывают, на то что самые древние горные породы формировались на Земле около 4 млрд. лет назад [47], [46].

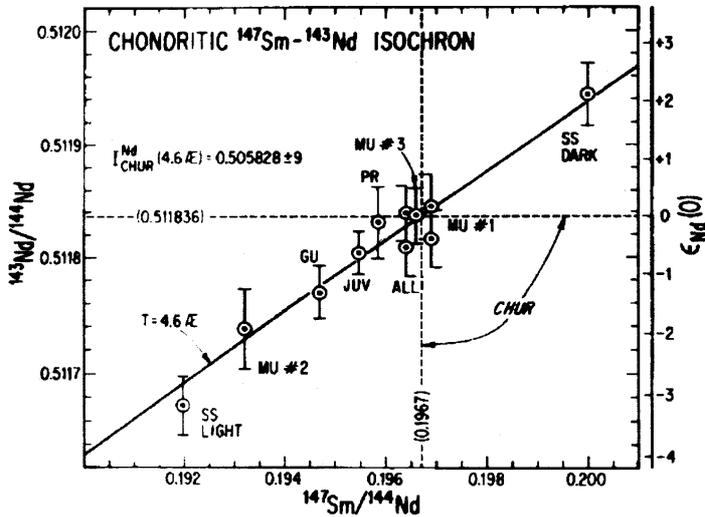
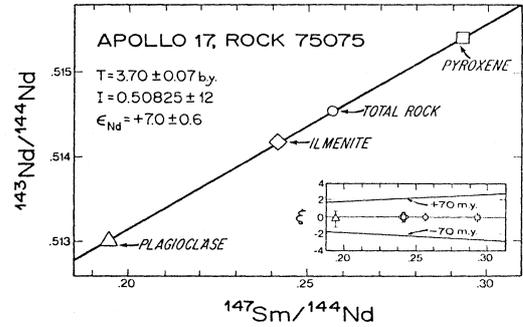


Рисунок 35: Изотопный анализ (Sm-Nd) возраста метеоритов-хондритов. Прямая соответствует возрасту 4.6 млрд.лет. Из работы [47].



Mineral isochron for lunar basalt 75075 (Lugmair et al. 1975)

Рисунок 36: Изотопная датировка (Sm-Nd) лунных пород, доставленных экспедицией "Аполлон-17". Из лекций Ю.А.Костицына [43].

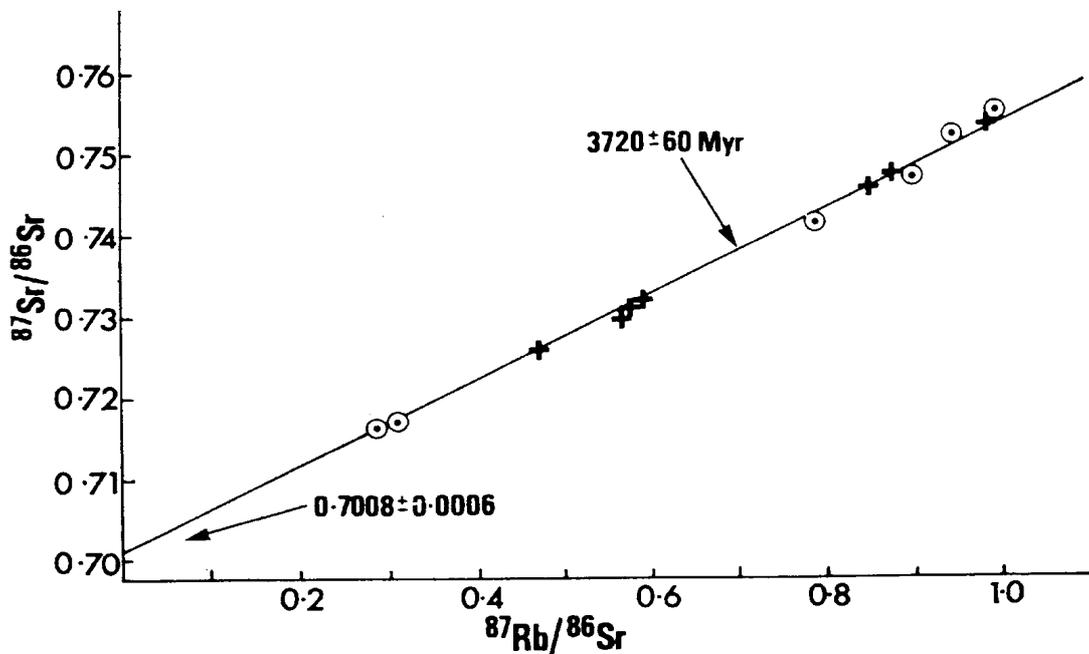


Рисунок 37: Изотопная датировка (Sr-Rb) гнейсов (древних горных пород) Гренландии. Из работы [46].