

В.Н.Глазков

«Атомная и ядерная физика»

Москва
2016

Оглавление

От автора.....	5
Об использовании открытых интернет-источников.....	5
Введение.....	13
Лекция 1. Место атомной и ядерной физики в физической картине мира. Некоторые вопросы атомной физики.....	14
Место атомной и ядерной физики в физической картине мира.....	14
Строение атомов.....	30
Строение атома рассматривается более подробно в курсе квантовой физики [7]. Вспомним вкратце основные результаты.....	30
Линейчатые спектры атомов. Спектры характеристического рентгеновского излучения..	33
Получение и применение рентгеновского излучения.....	38
Источники рентгеновского излучения.	39
Детектирование рентгеновского излучения.....	41
Рентгеновская оптика.....	42
Применения рентгеновского излучения.....	42
Взаимодействие атомов. Химическая связь.....	51
Атомный силовой микроскоп.....	52
Лекция 2. Строение ядра.....	56
Элементы квантовой электродинамики: виртуальные частицы и их экспериментальные подтверждения (сдвиг Лэмба, аномальный магнитный момент электрона, динамический эффект Казимира).....	56
Сдвиг Лэмба.....	57
Аномальный магнитный момент электрона.....	58
Эффект Казимира.....	58
Ядро атома. Краткая история открытия.....	59
Протон и нейтрон: их свойства.....	61
Протон.....	61
Нейтрон.....	62
Взаимодействие протонов и нейтронов в ядре.....	63
Энергия связи ядра и дефект массы.	64
Строение атомного ядра. Изотопы, изобары и изомеры.....	66
Капельная модель ядра.....	68
Оболочечная модель ядра.....	70
Возбуждённые состояния ядра. Изомеры.....	72
Радиоактивность.....	73
Закон радиоактивного распада.....	76
Альфа-распад.....	77
Бета-распад.....	81
Гамма-излучение.....	86
Протонный и нейтронный распады.....	86
Запаздывающие излучения.....	88
Лекция 3. Реакции ядерного деления и синтеза. Примеры ядерных реакций в природе и технике.....	89
Реакция ядерного синтеза.....	89
Спонтанное и индуцированное деление ядер.....	91
Реакции синтеза в звёздах.....	94
Реакции распада и спонтанного деления в природе.....	98
Изотопная датировка.....	100

Радиоуглеродный анализ.....	100
Изотопная датировка в геофизике.	102
Военные применения: атомная и водородная бомбы.....	107
Атомная энергетика.....	109
История.....	109
Принципы работы атомной энергетики.....	111
Виды ядерных реакторов.....	113
Экология и экономика ядерной энергетики: плюсы и минусы.....	117
Авария на Три-Майл-Айленд (США).....	118
Авария на Чернобыльской АЭС.....	120
Авария на АЭС Фукусима-1.....	122
Перспективы.....	123
Термоядерная энергетика.	124
Мюонный катализ.	125
Импульсная реакция.....	126
Квазистационарная реакция (токамаки).	128
Лекция 4. Элементарные частицы.....	130
История открытия элементарных частиц.....	130
Характеристики элементарных частиц.....	135
Масса покоя.....	135
Электрический заряд Q	135
Спин.....	136
Барионное число B (барионный заряд).....	136
Лептонное число L (лептонный заряд).....	136
Квантовое число " $B-L$ ".....	136
Странность S	137
Очарование C	137
Прелесть B'	137
Правдивость T	137
Изоспин I (I_z).....	138
Слабый изоспин T (T_z).....	138
Чётность P	139
СРТ-инвариантность и несохранение чётности.....	139
Частицы и античастицы.....	141
Аннигиляция.....	141
Антиматерия.....	141
Семейства элементарных частиц.....	143
Стандартная модель.....	143
Калибровочные бозоны.....	144
Бозон Хиггса.....	147
Лептоны.....	151
Кварки.....	152
Составные частицы.....	152
Лекция 5. Экспериментальные методы ядерной физики.	155
Детектирование частиц.....	155
Счётчик Гейгера.....	155
Детекторы нейтронов.....	156
Камера Вильсона.....	157
Пузырьковая камера.....	159
Искровые и многопроволочные (многопроволочные пропорциональные) камеры.....	161

Метод фотографических эмульсий.....	162
Детекторы нейтрино.....	163
Источники нейтронов для физических экспериментов.....	164
Институт Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция).....	165
Институт Поля Шерера (Виллиген, Швейцария).....	168
Нейтронные источники в России.....	173
Ускорители элементарных частиц.....	175
Виды ускорителей и история их развития.....	175
Ускорители ЦЕРН.....	183
Ускорители США: Стэнфорд, Фермилаб.....	189
Ускорители СССР и России: Протвино, Дубна, Новосибирск.....	192
Ускоритель У-70, Протвино.....	192
Объединённый институт ядерных исследований, Дубна.....	192
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера, Новосибирск.....	195
Нейтринные эксперименты.....	197
T2K (Япония). Исследование осцилляций нейтрино.....	197
OPERA (ЦЕРН). Измерение скорости нейтрино.....	200

От автора

Данный текст написан по курсу лекций, прочитанных автором в Московском институте открытого образования в 2012 году. Текст был вычитан в 2016 году с внесением незначительных исправлений. К сожалению, при внесении исправлений обнаружилось, что часть интернет-источников за это время стала недоступна, по возможности такие ссылки обновлены. Лекционный курс читался учителям физики средних школ, проходящим профессиональную переподготовку. Предполагается наличие у слушателей знаний в рамках базовой школьной программы, владение математическим аппаратом в рамках чуть больше школьной программы.

Данный текст не является полноценным учебником по ядерной физике. Цель курса — показать связанность физической картины мира, показать как получены наши знания об устройстве материи на атомном и субатомном уровне, продемонстрировать связь явлений атомной и ядерной физики с другими разделами физики. Курс был рассчитан на пять шестичасовых лекций, разбиение текста по темам связано с этим форматом представления курса. Для получения более систематических и строгих знаний по ядерной физике читателю рекомендуется обратиться к более специализированным учебникам, например [1], или к доступным он-лайн курсам по ядерной физике Физического факультета МГУ [2][3][4]. Богатый объём сведений, включая данные из многих оригинальных статей доступен на сайте проекта HyperPhysics Университета Джорджии [5].

Автор является с.н.с. Института физических проблем им.П.Л.Капицы и доцентом МФТИ. Не занимаясь профессионально вопросами атомной и ядерной физики (профессиональные интересы автора лежат в области квантовой физики, физики твёрдого тела и физики низких температур), автор надеется, что этот взгляд «немного со стороны» может быть полезен читателю.

Автор выражает благодарность всем слушателям МИОО, вместе с которыми и создавался лекционный курс, лёгший в основу этого текста.

Данный текст создан в некоммерческих образовательных целях. Используемые рисунки и данные взяты в открытых источниках и снабжены соответствующими ссылками на оригиналы. Разрешается свободное распространение этих материалов в некоммерческих целях без изменения содержания на условиях лицензии Creative Commons: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International.

Москва, 2016

Об использовании открытых интернет-источников.

Большая часть из ссылок в списке литературы приведена на открытые источники, в частности на статьи «Википедии». Автор считает своим долгом отметить, что использование интернет-источников всегда требует некоторой осторожности: расплатой за кажущуюся доступность информации является иногда неконтролируемый уровень ее достоверности. В особенности это относится к популярной «Википедии», где авторами статей порой являются неизвестные пользователи. Общим правилом является большее доверие к информации в специализированных научных журналах, информации с официальных сайтов специализированных организаций, проверка данных открытых источников на соответствие их общефизическим принципам. Все цитируемые статьи открытых источников на момент их просмотра с точки зрения автора и в меру его профессиональной компетенции содержали достоверную информацию.

Список литературы

- [1]: В.Е.Белонучкин, Д.А.Заикин, Ю.М.Ципенюк, Основы физики, том 2 (2007)
- [2]: Физический факультет МГУ, Кафедра общей ядерной физики, Ядерная физика в Интернете, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
- [3]: Л.И. Сарычева, ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ МИКРОМИРА — ФИЗИКА ЧАСТИЦ И ЯДЕР, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/astro/index.html>
- [4]: В.В.Варламов, Н.Г.Гончарова, Б.С.Ишханов, Физика ядра и банки ядерных данных, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ndb/>
- [5]: R.Nave, HyperPhysics: Nuclear, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [6]: Нобелевский комитет, Официальный сайт Нобелевского комитета (информация о лауреатах, Нобелевские лекции), www.nobelprize.org
- [7]: В.Н.Глазков, Введение в квантовую физику, <http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/quantum.pdf>
- [8]: wikipedia.org, Энергия ионизации, https://ru.wikipedia.org/wiki/Энергия_ионизации
- [9]: wikipedia.org, Atomic orbitals, http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_orbital
- [10]: Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. , Курс теоретической физики т.3: Квантовая механика ()
- [11]: wikipedia.org, Electromagnetic spectrum, https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum
- [12]: Lawrence Berkley National Laboratory, X-ray data booklet (2009)
- [13]: University of Wisconsin–Madison, EPMA History - Some documents and oral history links (в т.ч. о работах Г.Мозли), <http://www.geology.wisc.edu/~johnf/g777/EPMA-history.html>
- [14]: wikipedia.org, Тормозное излучение, <http://en.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>
- [15]: wikipedia.org, Synchrotron radiation, http://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron_radiation
- [16]: wikipedia.org, ESRF, <http://en.wikipedia.org/wiki/ESRF>
- [17]: ESRF, European Synchrotron Radiation Facility Homepage , www.esrf.eu
- [18]: Lightsources.org, Lightsources of the world, <http://www.lightsources.org/regions>
- [19]: ESRF, ID11, , <http://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/MaterialsScience/faisceau>
- [20]: wikipedia.org, X-ray, <http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray>
- [21]: wikipedia.org, , http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography
- [22]: Н. Lipson, Weissenberg's Influence on Crystallography (in Karl Weissenberg - The 80th Birthday Celebration Essays), http://weissenberg.bsr.org.uk/1/Weissenbergs_Influence_on_Crystallography.htm
- [23]: wikispaces.com, Hystory of DNA, <http://ap-biology-lab.wikispaces.com/6c.+History+of+DNA>
- [24]: Компания "Юнитест-рентген", Комплексы рентгеновского контроля, <http://www.unitest-roentgen.ru/projects.html>
- [25]: wikipedia.org, X-ray generator, https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_generator
- [26]: wikipedia.org, Industrial radiography, http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_radiography
- [27]: wikipedia.org, Semiconductor manufacturing processes, http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_manufacturing_processes
- [28]: F.Hartley, C.Malek , Nanometer X-ray lithography, Proceedings of SPIE, (1999)
- [29]: Sergey Vasiliev, Turku Centre for Quantum Physics, Atomic Hydrogen, http://users.utu.fi/jmiaho/H_www/index.html
- [30]: wikipedia.org, Atomic force microscopy, http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy
- [31]: EP6, University of Augsburg, AFM images gallery, http://www.physik.uni-augsburg.de/exp6/imagegallery/afmimages/afmimages_e.shtml
- [32]: CNRS, AFM images, http://recamia.rhone-alpes.cnrs.fr/gallery/AFM/irc_afm_agregats_sb

- [33]: Intertech Corporation, AFM Images, www.intertech-corp.ru
- [34]: Asylum Research, Cypher Image Gallery, <http://www.asylumresearch.com/Gallery/Cypher/CypherGallery.shtml>
- [35]: HyperPhysics, Lamb shift, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/lamb.html>
- [36]: wikipedia.org, Anomalous magnetic dipole moment, https://en.wikipedia.org/wiki/Anomalous_magnetic_dipole_moment
- [37]: A. Hoecker, W.J. Marciano, The muon anomalous magnetic moment, <http://pdg.lbl.gov/2013/reviews/rpp2013-rev-g-2-muon-anom-mag-moment.pdf>
- [38]: В.М. Мостепаненко, Н.Н. Трунов, Эффект Казимира и его приложения, УФН, 156, 385 (1988)
- [39]: G. Bressi, G. Carugno, R. Onofrio, G. Ruoso, Measurement of the Casimir force between parallel metallic surfaces, Physical Review Letters, 88, 041804 (2002)
- [40]: H. Geiger and E. Marsden, On a Diffuse Reflection of the α -Particles., Proc. Roy. Soc., 82, 495 (1909)
- [41]: chemteam.info, Rutherford's Experiment - Part II: The Paper of 1911, <http://www.chemteam.info/AtomicStructure/Rutherford-Model.html>
- [42]: E. Rutherford, The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom, Philosophical Magazine, 21, 669 (1911)
- [43]: С.С.Герштейн, На заре ядерной физики, Природа, 8 (2004)
- [44]: Фонд "Новая мысль", Открытие пионов (пи-мезонов). Теория ядерных сил Юкавы, <http://novmysl.ru/Quantum/Pions.html>
- [45]: wikipedia.org, Nuclear binding energies, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy
- [46]: wikipedia.org, Isotope, <http://en.wikipedia.org/wiki/Isotope>
- [47]: wikipedia.org, Beta decay, http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_decay
- [48]: Лаборатория радиационного контроля ЛРК-1 МИФИ, Азы науки о радиоактивности, <http://www.radiation.ru/begin/begin.htm>
- [49]: А.А.Акатов, Ю.С.Коряковский, Радиация: опасность реальная и вымышленная (2010)
- [50]: А.А.Акатов, Ю.С.Коряковский, Радиационная мифология (2010)
- [51]: wikipedia.org, Henri Becquerel (английская версия), http://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel
- [52]: wikipedia.org, Henri Becquerel (французская версия), http://fr.wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel
- [53]: wikipedia.org, Alpha decay, http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_decay
- [54]: GAZPROM Informatorium, Producing helium from natural gas, <http://www.gazprominfo.com/articles/helium/>
- [55]: wikipedia.org, Alpha particle spectroscopy, http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha_particle_spectroscopy
- [56]: wikipedia.org, Radioisotope, <http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope>
- [57]: wikipedia.org, Radioisotope thermoelectric generator, http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
- [58]: G.J.Neary, The beta-ray spectrum of radium E [Bi-210], Proc. R. Soc. Lond. A, 175, 71 (1940)
- [59]: wikipedia.org, Double beta decay, http://en.wikipedia.org/wiki/Double_beta_decay
- [60]: wikipedia.org, Positron emission tomography, http://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography
- [61]: wikipedia.org, Gamma rays, http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray
- [62]: wikipedia.org, Протонный распад, http://ru.wikipedia.org/wiki/Протонный_распад
- [63]: J. Giovinazzo, B. Blank, M. Chartier, S. Czajkowski, A. Fleury, M. J. Lopez Jimenez, M. S. Pravikoff, J.-C. Thomas, F. de Oliveira Santos, M. Lewitowicz, V. Maslov, M. Stanoiu, R. Grzywacz, M. Pfützner, C. Borcea, and B. A. Brown, Two-Proton Radioactivity of Fe-45, Phys.

- Rev. Lett., 89, 102501 (2002)
- [64]: wolframalfa.com, Iron-45 Information List,
http://www.wolframalpha.com/entities/isotopes/iron_45/yn/um/uf/
- [65]: K. Miernik, W. Dominik, Z. Janas, M. Pfützner, C. R. Bingham, H. Czyrkowski, M. Ćwiok, I. G. Darby, R. Dąbrowski, T. Ginter, R. Grzywacz, M. Karny, A. Korgul, W. Kuśmierz, S. N. Liddick, M. Rajabali, K. Rykaczewski, and A. Stolz, First observation of β -delayed three-proton emission in Fe45, Phys. Rev. C , 76, 041304 (2007)
- [66]: M. Pomorski, K. Miernik, W. Dominik, Z. Janas, M. Pfützner, C. R. Bingham, H. Czyrkowski, M. Ćwiok, I. G. Darby, R. Dąbrowski, T. Ginter, R. Grzywacz, M. Karny, A. Korgul, W. Kuśmierz, S. N. Liddick, M. Rajabali, K. Rykaczewski, and A. Stolz, β -delayed proton emission branches in Cr43, Phys. Rev. C, (2011)
- [67]: wikipedia.org, Nuclear fusion, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion
- [68]: P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A , 107, 349 (1925)
- [69]: M. L. Oliphant , P. Harteck and Rutherford, Transmutation Effects observed with Heavy Hydrogen, Nature, 133, 413 (1934)
- [70]: M. L. E. Oliphant, P. Harteck, Lord Rutherford, Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen, Proceedings of the Royal Society A, 144, 692 (1934)
- [71]: wikipedia.org, Nuclear fission, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission
- [72]: wikipedia.org, Nuclear chain reaction, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_chain_reaction
- [73]: В.Н.Глазков, Астрономия, <http://www.kapitza.ras.ru/people/glazkov/teaching/astronomy.pdf>
- [74]: В.Н.Рыжов, Звездный нуклеосинтез - источник происхождения химических элементов ,
<http://www.astronet.ru/db/msg/1167293>
- [75]: E. Margaret Burbidge, G. R. Burbidge, William A. Fowler, and F. Hoyle, Synthesis of the Elements in Stars, Rev. Mod. Phys. , 29, 547 (1957)
- [76]: wikipedia.org, Sun, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>
- [77]: wikipedia.org, Proton-proton chain reaction, https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain_reaction
- [78]: wikipedia.org, Decay chain, http://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain
- [79]: NASA, Oklo: Ancient African Nuclear Reactors , <http://apod.nasa.gov/apod/ap100912.html>
- [80]: wikipedia.org, Oklo, <https://en.wikipedia.org/wiki/Oklo>
- [81]: Крис Терни, Кости, скалы и звезды. Наука о том, когда что произошло (2016)
- [82]: wikipedia.org, Radiocarbon dating, http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_dating
- [83]: wikipedia.org, Dendrochronology, <https://en.wikipedia.org/wiki/Dendrochronology>
- [84]: University of Arizona, Laboratory of Tree-Ring Research, <http://tree.ltrr.arizona.edu;>
<http://tree.ltrr.arizona.edu/skeletonplot/exampleapplication.htm>
- [85]: wikipedia.org, Radiocarbon dating of Shroud of Turin,
https://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_14_dating_of_the_Shroud_of_Turin
- [86]: Ю.А.Костицын, Геохимия изотопов и геохронология.,
http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Геохимия_изотопов_и_геохронология
- [87]: wikipedia.org, Radiometric dating, https://en.wikipedia.org/wiki/Radiometric_dating
- [88]: NASA, NASA Curiosity: First Mars Age Measurement and Human Exploration Help,
<http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-356>
- [89]: 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)
- [90]: Jacobsen S.B., Wasserburg G.J., Sm-Nd isotopic evolution of chondrites, Earth and Planetary Science Letters, 50, 139 (1980)
- [91]: wikipedia.org, Nuclear weapon, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_weapon
- [92]: wikipedia.org, Sedan (nuclear test), [http://en.wikipedia.org/wiki/Sedan_\(nuclear_test\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Sedan_(nuclear_test))

- [93]: atomicarchive.com, History : The First Pile , <http://www.atomicarchive.com/History/firstpile>
- [94]: University of Chicago, Fermi Image Gallery, <http://fermi.lib.uchicago.edu/fermiimages.htm>
- [95]: Госкорпорация "Росатом", Об атомной отрасли, <http://www.rosatom.ru/nuclearindustry/>
- [96]: Акатов А.А., Коряковский Ю.С., Атом мирный - первый (2010)
- [97]: А.А.Акатов, Ю.С.Коряковский, Атомные электростанции и биосфера (2010)
- [98]: А.А.Акатов, Ю.С.Коряковский, Ключ к Арктике (2010)
- [99]: А.А.Акатов, Ю.С.Коряковский , Быстрая энергетика (2010)
- [100]: wikipedia.org, Nuclear power, http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power
- [101]: МИФИ, Исследовательский реактор МИФИ,
http://wiki.mephist.ru/wiki/Реактор_МИФИ
- [102]: wikipedia.org, List of nuclear reactors, http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_nuclear_reactors
- [103]: wikipedia.org, Nuclear marine propulsion,
https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_marine_propulsion
- [104]: World Nuclear Association website, Nuclear-Powered Ships, <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>
- [105]: wikipedia.org, Nuclear submarine, https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_submarine
- [106]: wikipedia.org, Typhoon-class submarine, https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon-class_submarine
- [107]: Официальный туристический портал Мурманской области, Исторический музей-ледокол «Ленин» , <http://murmantourism.ru/>
- [108]: wikipedia.org, Institut Laue–Langevin, http://en.wikipedia.org/wiki/Institut_Laue-Langevin
- [109]: Official ILL website, Institut Laue-Langevin, <https://www.ill.eu/>
- [110]: Brookhaven National Laboratory, Chart of Nuclides, <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>
- [111]: wikipedia.org, Bhopal disaster, https://en.wikipedia.org/wiki/Bhopal_disaster
- [112]: Всемирная организация здравоохранения, Чернобыль: истинные масштабы аварии,
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/ru/>
- [113]: wikipedia.org, Three Mile Island accident,
https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident
- [114]: wikipedia.org, Авария на Чернобыльской АЭС,
http://ru.wikipedia.org/wiki/Авария_на_Чернобыльской_АЭС
- [115]: wikipedia.org, Fukushima Daiichi nuclear disaster,
https://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster
- [116]: Euro Comission, Navigation path European Commission Research & Innovation Energy Euratom Energy Facts & Figures,
http://ec.europa.eu/research/energy/euratom/index_en.cfm?pg=faq
- [117]: wikipedia.org, Helium-3, <https://en.wikipedia.org/wiki/Helium-3>
- [118]: Б.М.Карнаков, Мюонный катализ ядерного синтеза, Соросовский образовательный журнал, 12, 62 (1999)
- [119]: С.С.Герштейн, Ю.В.Петров, Л.И.Пономарёв, Мюонный катализ и ядерный бридинг, УФН, 160, 3 (1990)
- [120]: W. H. Breunlich, P. Kammel, I. S. Cohen and M. Leon, Muon catalysed fusion, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 39, 311 (1989)
- [121]: C. Petitjean, Muon catalysed fusion, Specialist Meeting on Accelerator Based Transmutation, p.408 (1992)
- [122]: L. W. Alvarez, H. Bradner, F. S. Crawford, JR., J. A. Crawford, P. Falk-Vairant, M. L. Good, J. D. Gow, A. H. Rosenfeld, F. Solmitz, M. L. Stevenson, H. K. Ticho and R. D. Tripp, Catalysis of Nuclear Reactions by mu-Mesons, Physical Review, 105, 1127 (1957)
- [123]: Lawrence Livermore National Laboratory, National Ignition Facility & Photon Science,
<https://lasers.llnl.gov/>

- [124]: tokamak.info, All-the-World's Tokamaks, <http://www.tokamak.info/>
- [125]: УТС-Центр, Координационный центр "Управляемый термоядерный синтез - международные проекты", <http://www.iterru.ru>
- [126]: ITER, ITER - the way to new energy, <http://www.iter.org>
- [127]: CCFE, Culham Centre of Fusion Energy, <http://www.ccfе.ac.uk/>
- [128]: wikipedia.org, ITER, <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
- [129]: wikipedia.org, DEMO (DEMONstration Power Plant), <https://en.wikipedia.org/wiki/DEMO>
- [130]: Euratom-CEA, Tore Supra, <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/cea/ts/ts.htm>
- [131]: American Institute of Physics, Center for History of Physics, The discovery of Electron, <https://www.aip.org/history/exhibits/electron/>
- [132]: cambridgephysics.org, the Museum at the Cavendish Laboratory, <http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/museum/tour.htm>
- [133]: wikipedia.org, Cathode ray, https://en.wikipedia.org/wiki/Cathode_ray
- [134]: C.D.Anderson, The Positive Electron, Physical Review , 43, 491 (1933)
- [135]: C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, and R. P. Hudson, Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay, Physical Review, 105, 1413 (1957)
- [136]: Hyperphysics project, Georgia State University, C.R.Nave, Parity, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/parity.html>
- [137]: CERN, The Antiproton Decelerator, <http://home.cern/about/accelerators/antiproton-decelerator>
- [138]: wikipedia.org, Antimatter, <https://en.wikipedia.org/wiki/Antimatter>
- [139]: Д. И. Казаков, Хиггсовский бозон открыт: что дальше?, УФН, 184, 1004 (2014)
- [140]: wikipedia.org, Standard Model, https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model
- [141]: wikipedia.org, W and Z bosons, https://en.wikipedia.org/wiki/W_and_Z_bosons
- [142]: Hyperphysics project, Georgia State University, HyperPhysics:Quantum Physics: Particles, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/parcon.html>
- [143]: wikipedia.org, Color charge, http://en.wikipedia.org/wiki/Color_charge
- [144]: В.А.Рубаков, К открытию на большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса, УФН, 182, 1017 (2012)
- [145]: Particle Data Group, K.A.Olive et al., Status of Higgs boson physics, Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)
- [146]: Adrian Cho, Mass of the Common Quark Finally Nailed Down, Science Online, <http://www.sciencemag.org/news/2010/04/mass-common-quark-finally-nailed-down> (2010)
- [147]: Hyperphysics Project, Georgia State University, Quarks, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/quark.html#c1>
- [148]: LHCb Collaboration, Observation of the resonant character of the $Z(4430)^-$ state, arXiv.org > hep-ex > arXiv:1404.1903 (2014)
- [149]: Eric Swanson, Viewpoint: New Particle Hints at Four-Quark Matter, Physics , 6, 69 (2013)
- [150]: R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), Observation of J/ψ Resonances Consistent with Pentaquark States in $\Lambda^0_b \rightarrow J/\psi K^- p$ Decays, Phys. Rev. Lett., 15, 072001 (2015)
- [151]: Kenneth Hicks, Viewpoint: Elusive Pentaquark Comes into View, Physics, 8, 77 (2015)
- [152]: wikipedia.org, Geiger-Muller tube, http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_Müller_tube
- [153]: ILL, Neutron detectors, <http://www.ill.eu/science-technology/neutron-technology-at-ill/detectors/miland/>
- [154]: Memorial museum of Cavendish Laboratory, Wilson Chamber Discovery, <http://chambrebrouillard.wifeo.com/history-and-achievements.php>
- [155]: , Wison Chamber Demo, <http://www.darvill.clara.net/mydown.htm>
- [156]: , Hystorical tracks of alpha particles by Blackett, <http://www.courtauld.ac.uk/researchforum/events/2011/spring/ShowsofLondon.shtml>
- [157]: CERN, CERN for teachers: Bubble Chambers,

http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm
 [158]: BNL, Hystorical tracks of Omega-minus particle,
<http://www.bnl.gov/bnlweb/history/Omega-minus.asp>
 [159]: BNL, On the dyscovery of muon neutrino,
http://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel/nobel_88.asp
 [160]: wikipedia.org, Sudbury Neutrino Observatory,
http://en.wikipedia.org/wiki/Sudbury_Neutrino_Observatory
 [161]: , Список источников нейтронов ,
http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/neutr_gen/index.html
 [162]: PSI, Official Web-site, www.psi.ch
 [163]: НИЦ "Курчатовский институт", Научно-исследовательский реакторный комплекс ВВР-М, <http://www.nrcki.ru/pages/main/6015/7142/index.shtml>
 [164]: Отдел физики высоких энергий ПИЯФ, Лаборатория физики высоких энергий,
<http://hepd.pnpi.spb.ru/nrd/pnpiroot.html#AA>
 [165]: atominfo.ru, 50 лет ВВР-ц, <http://www.atominfo.ru/newsj/q0538.htm>
 [166]: ИФМ УрО РАН, Нейтронный материаловедческий комплекс Института физики металлов УрО РАН на исследовательском атомном реакторе ИВВ-2М (НМК ИФМ),
<http://www.imp.uran.ru/?q=ru/content/neytronnyy-materialovedcheskiy-kompleks-instituta-fiziki-metallov-uro-ran-na>
 [167]: НИЦ "Курчатовский Институт", Исследовательский нейтронный реактор ИР-8,
<http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/12404/index.shtml>
 [168]: ОИЯИ, Реактор ИБР-2, <http://flnp.jinr.ru/5/>
 [169]: НИЦ "Курчатовский Институт", Высокопоточный исследовательский реактор ПИК,
<http://www.nrcki.ru/pages/main/6015/7147/index.shtml>
 [170]: wikipedia.org, Cockroft-Walton Generator, http://en.wikipedia.org/wiki/Cockcroft-Walton_generator
 [171]: wikipedia.org, Van de Graaf Generator,
http://en.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff_generator
 [172]: Fermilab, Cockroft-Walton Generator at Fermilab,
<http://www.fnal.gov/pub/inquiring/physics/accelerators/chainaccel.html>
 [173]: wikipedia.org, Linear particle accelerator,
http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_particle_accelerator
 [174]: Stanford University, Accelerators for medical applications,
<http://news.stanford.edu/news/2007/april18/med-accelerator-041807.html>
 [175]: wikipedia.org, Stanford Linear Accelerator Center,
http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_Linear_Accelerator_Center
 [176]: wikipedia.org, Cyclotron, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclotron>
 [177]: TRIUMF, TRIUMF Cyclotron Center, <http://www.triumf.ca>
 [178]: wikipedia.org, Betatron, <http://en.wikipedia.org/wiki/Betatron>
 [179]: ИЯФ МГУ, Бетатрон, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/accelerators/betatron.htm>
 [180]: ИЯФ МГУ, Синхротрон, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/accelerators/synchro.htm>
 [181]: wikipedia.org, Synchrotron, <http://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron>
 [182]: wikipedia.org, Fermilab, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fermilab>
 [183]: wikipedia.org, CERN, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cern>
 [184]: CERN, Official Web-page, www.cern.ch
 [185]: CERN, CERN Accelerator Complex,
<http://public.web.cern.ch/public/en/Research/AccelComplex-en.html>
 [186]: CERN, Large Hadron Collider, <http://home.cern/topics/large-hadron-collider>
 [187]: wikipedia.org, Large Hadron Collider, http://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider
 [188]: CERN, ALICE, <http://home.cern/about/experiments/alice>

- [189]: wikipedia.org, ALICE: A Large Ion Collider Experiment, https://en.wikipedia.org/wiki/ALICE:_A_Large_Ion_Collider_Experiment
- [190]: wikipedia.org, ATLAS experiment, https://en.wikipedia.org/wiki/ATLAS_experiment
- [191]: CERN, ATLAS, <http://home.cern/about/experiments/atlas>
- [192]: CERN, The ATLAS experiment, <http://hedberg.web.cern.ch/hedberg/home/atlas/atlas.html>
- [194]: CERN, What is CMS?, <http://cms.web.cern.ch/news/what-cms>
- [193]: wikipedia.org, Compact Muon Solenoid, https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_Muon_Solenoid
- [195]: wikipedia.org, LHCb, <https://en.wikipedia.org/wiki/LHCb>
- [196]: CERN, LHCb, <http://home.cern/about/experiments/lhcb>
- [197]: SLAC, SLAC: National Accelerator Laboratory, <https://www6.slac.stanford.edu/>
- [198]: Fermilab, Fermi National Accelerator Laboratory, <http://www.fnal.gov/>
- [199]: Институт Физики Высоких Энергий, Отделение ускорительного комплекса, Отделение ускорительного комплекса
- [200]: <http://orloffm.livejournal.com/>, Экскурсия на ускоритель У-70, фотографии, <http://orloffm.livejournal.com/264505.html?>
- [201]: ОИЯИ, Официальный сайт Объединённого института ядерных исследований, <http://www.jinr.ru/>
- [202]: ОИЯИ, NICA: Nuclotron-based Ion Collider fAcility, <http://nica.jinr.ru/>
- [203]: ОИЯИ, Лаборатория Ядерных Проблем имени В.П.Джелепова: Фазотрон, <http://phasotron.jinr.ru/>
- [204]: ОИЯИ, Лаборатория ядерных реакций: ускорительные комплексы, http://flerovlab.jinr.ru/flnr/accelerators_rus.html
- [205]: ИЯФ им.Г.И.Будкера, Официальный веб-сайт, <http://www.inp.nsk.su/>
- [206]: <http://dedmaxopka.livejournal.com/>, Экскурсия в ИЯФ, <http://dedmaxopka.livejournal.com/55244.html>
- [207]: wikipedia.org, Neutrino oscillation, http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillations
- [208]: С.С.Герштейн, Загадки солнечных нейтрино, Соросовский образовательный журнал, 8, 79 (1997)
- [209]: С.И. Сергеева , Эксперимент MINOS, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/MINOS/index.html>
- [210]: wikipedia.org, OPERA (эксперимент), [https://ru.wikipedia.org/wiki/OPERA_\(эксперимент\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/OPERA_(эксперимент))
- [211]: T2K, T2K (Tokai to Kamioka) neutrino experiment, <http://t2k-experiment.org/t2k/>
- [212]: Super Kamiokande, Photo Gallery, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/gallery/index-e.html>
- [213]: T2K collaboration, First muon-neutrino disappearance study with an off-axis beam, Physical Review D, 85, 031103 (2012)
- [214]: OPERA Collaboration, Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam, arXiv.org > hep-ex >, 1109.4897 (2011)

Введение.

Атомная и ядерная физика исследуют мельчайшие «кирпичики мироздания» - атомы, ядра, элементарные частицы, взаимодействия между ними. В научной деятельности развитие экспериментальных методов ядерной физики привело к возникновению циклопических экспериментальных установок (ускорителей, коллайдеров) и к формированию огромных международных научных коллективов. Результатом этого поиска, помимо естественного стремления удовлетворить любопытство исследователя, явился и прогресс в различных связанных областях физики (в частности, рождение кварковой модели устройства частиц и теории объединения взаимодействий), так и появление новых технологий как мирного, так и военного назначения.

Курс преследует две основные цели:

1. Формирование связанной картины современных представлений об атомной и ядерной физике (в частности, о различных внутриатомных и внутриядерных процессах, о известных элементарных частицах, Стандартной модели).
2. Применение методов и результатов атомной и ядерной физики в технике, других областях науки.

Лекция 1. Место атомной и ядерной физики в физической картине мира. Некоторые вопросы атомной физики.

Место атомной и ядерной физики в физической картине мира.

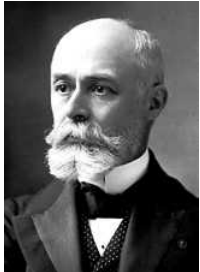
Идея поиска мельчайшего «кирпичика мироздания» была манящей на протяжении всего развития нашей цивилизации. Концепция «атома» возникла ещё в трудах древнегреческих философов, однако перевод этой концепции из философской области в исследовательскую требовал определённого развития экспериментальных методов наблюдения, ставших доступными лишь к середине 19 века. Для того чтобы заглянуть внутрь атома, понадобилось дальнейшее развитие, перешедшее в область эксперимента со знаменитыми опытами Резерфорда по рассеянию альфа-частиц. Поэтому атомную и ядерную физику можно считать наукой молодой, даже пожалуй более юной (особенно в своей ядерной части), чем квантовая физика. Однако многие из результатов, открытий этой юной науки оказали определяющее влияние на формирование современной картины мира.

В целях данного курса, говоря об атомной физике мы будем подразумевать в основном физические явления и процессы в которых ядра атомов не изменяются, то есть в основном процессы, связанные с переходом электронов между атомными уровнями энергии либо между атомами. Под задачами ядерной физики мы, соответственно будем понимать вопросы строения ядра, взаимодействия нуклонов и более общие вопросы физики элементарных частиц.

В качестве оценки влияния атомной и ядерной физики на современную картину мира, давайте посмотрим на список Нобелевских премий, присуждённых за открытия в этих областях. При этом постараемся оставить только наиболее значимые открытия, так как большая часть всех открытий в области квантовой физики оказывается прямо или косвенно связана с атомной (ядерной) физикой. Этот список также позволит нам получить быстрое представление о развитии атомной и ядерной физики за последние 100-150 лет.

Итак¹:

¹ Фотографии в таблице ниже взяты с сайта Нобелевского комитета [6]

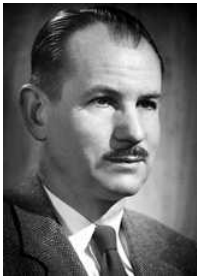
1901 год		Вильгельм Конрад Рентген, «за открытие названного в его честь излучения». Как мы знаем (и повторим позднее), рентгеновское излучение связано с переходами электронов между состояниями на внутренних оболочках атомов.
1903 год	  	Антуан Анри Беккерель, 1/2 премии, «за открытие спонтанной радиоактивности», и Пьер Кюри совместно с Марией Склодовской-Кюри, 1/2 премии, «за исследование открытой Беккерелем радиации».
1906 год		Джозеф Джон Томпсон «за великую ценность его теоретических и экспериментальных исследований электропроводности газов». Фактически, в этих исследованиях было доказано существование электрона — частицы-переносчика элементарного заряда.
1908 год (химия)		Эрнст Резерфорд, «за его исследования распада элементов и за химию радиоактивных веществ» Физик Резерфорд получил Нобелевскую премию по химии за его работы в области радиоактивного распада. В частности, в работах Резерфорда были получены указания на то что при радиоактивном распаде образуется гелий (альфа-частицы).

1911 (химия)		Мария Кюри (урождённая Склодовская), «в признание её заслуг в развитие химии, проявившихся в открытии элементов радия и полония, выделении радия и изучения происхождения и соединений этого примечательного элемента».
1917 год		Чарльз Гловер Баркла, «за открытие характеристического рентгеновского излучения элементов». Это открытие показало, что длина волны рентгеновского излучения определяется химическим составом катода и явилось одним из подтверждений боровской модели атома.
1921 год (химия)		Фредерик Содди, «за его вклад в наше знание о химии радиоактивных веществ и его исследования происхождения и природы изотопов». Ф.Содди работал вместе с Резерфордом. Среди его открытий: обнаружение того что в одной клетке периодической системы Менделеева (т.е. обладая тождественными химическими свойствами) могут находиться атомы с разными физическими свойствами (в т.ч. массами), формулировка закона альфа-распада (смещение на два столбца в периодической таблице).
1922 год		Нильс Бор, «за его заслуги в изучении структуры атома и исходящего от атома излучения»
1922 год (химия)		Фрэнсис В.Астон, «за его открытие при помощи масс-спектрометра изотопов в большом количестве не радиоактивных элементов и за изложение 'правила целых чисел'» В частности, Ф.Астон с большой точностью показал, что массы атомов принимают дискретные значения, что, как мы сейчас понимаем, объясняется тем, что тяжёлое ядро состоит из целого числа нуклонов.

1924 год		Карл Манне Георг Зигбан, «за его открытия и исследования в области рентгеновской спектроскопии»
1927 год	 	Артур Холли Комптон, 1/2 премии, «за открытие названного в его честь эффекта», Чарльз Томсон Рис Вилсон, 1/2 премии, «за метод визуализации траекторий заряженных частиц по конденсации пара». Эффект Комптона связан как со свойствами элементарной частицы — электрона, так и с квантовыми свойствами света. Изобретение Вильсона — это знаменитая камера Вильсона, один из первых методов обнаружения и идентификации частиц (в том числе в процессах распада). Резерфорд называл камеру Вильсона "the most original and wonderful instrument in scientific history" (наиболее оригинальный и удивительный инструмент в истории науки). Принцип работы камеры — конденсация пересыщенного пара на центрах, образуемых возмущениями при движении частицы в газе.
1934 год (химия)		Гарольд Клейтон Урей, «за его открытие тяжёлого водорода».
1935 год		Джеймс Чедвик, «за открытие нейтрона». Этим был обнаружен следующий «кирпичик» в строении атома.

1935 год (химия)	 	Фредерик Жолио и Ирен Жолио-Кюри, совместно, «в признание их синтеза новых радиоактивных элементов». В частности, лауреаты обнаружили, что при бомбардировке алюминиевой мишени альфа-частицами (образующимися при распаде полония, за открытие которого получила Нобелевскую премию Мария Кюри, мать Ирен) образуются радиоактивные изотопы фосфора и кремния.
1936 год	 	Виктор Франц Гесс, 1/2 премии, «за открытие космических лучей», и Карл Дэвид Андерсон, 1/2 премии, «за открытие позитрона». Космические лучи — потоки элементарных частиц и радиации, рождённые в космосе, являлись одним из первых источников элементарных частиц, доступных исследователю. Исследование того, как космические лучи ведут себя в магнитном поле (визуализованные при помощи камеры Вильсона) привело к открытию антипода электрона — позитрона.
1938 год		Энрико Ферми, «за демонстрацию образования новых радиоактивных элементов в результате облучения нейтронами и за связанное с этим открытие ядерных реакций вызываемых медленными нейтронами»
1939 год		Эрнст Орландо Лоуренс, «за изобретение и развитие циклотрона и за полученные с его помощью результаты, в особенности в области получения искусственных радиоактивных элементов» Первый ускоритель частиц, первый шаг к лабораторному «производству» новых частиц и изотопов.

1943 год		Отто Штерн, в частности «за открытие магнитного момента протона»
1943 год (химия)		Дьёрдь (Георг) де Хевеши, «за использование изотопов в качестве маркеров в изучении химических процессов».
1944 год (химия)		Отто Ган, «за открытие распада тяжёлых ядер». Ган обнаружил что при бомбардировке тяжёлых ядер урана и тория нейтронами могут образовываться элементы из середины периодической таблицы — то есть помимо альфа и бета распадов, при которых образуются изотопы близких элементов, возможны и процессы с делением ядра на примерно равные части. Выделение энергии в таких процессах — основа ядерной энергетики.
1948 год		Патрик Мэйнард Стюарт Блэкет, «за развитие метода камеры Вильсона и за открытия в ядерной физике и физике космических лучей». Среди наблюдений Блэкета: возникновение электрон-позитронной пары из гамма-кванта, «дожди» частиц в космическом излучении, наблюдение мезонов в космическом излучении.
1949 год		Хидеки Юкава, «за предсказание существования мезонов и за основополагающие теоретические работы по природе ядерных сил». Юкава предсказал существование новых элементарных частиц — мезонов в 1934 году. Частицы были экспериментально обнаружены в космическом излучении в 1937 году, позднее их научились получать с помощью циклотронов.

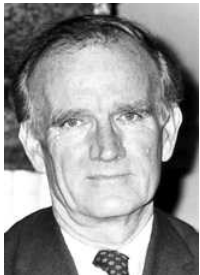
1950 год		Сесил Фрэнк Поуэл, «за развитие фотографического метода для применения в исследованиях ядерных процессов и его открытия в изучении мезонов, полученные при помощи этого метода». Развитие метода фотоэмульсий позволило надёжнее и удобнее фиксировать треки частиц. В частности, Поуэлом были точно измерены массы различных мезонов.
1951 год	 	сэр Джон Дуглас Кокрофт и Эрнст Томас Синтон Валтон, совместно, «за их пионерскую работу по превращению атомных ядер искусственно ускоренными атомными частицами»
1951 год (химия)	 	Эдвин Маттисон МакМиллан и Гленн Теодор Сеаборг, совместно, «за их открытия в химии трансурановых элементов». Лауреатами были впервые выделены некоторые изотопы урана и некоторые из трансурановых элементов.
1955 год		Виллис Эжен Ламб, 1/2 премии, «за открытия, касающиеся тонкой структуры спектра водорода», и Поликарп Куш, 1/2 премии, «за точное измерение магнитного момента электрона». Оба этих открытия связаны с небольшими аномалиями в поведении электрона, которые однако надёжно обнаружимы. Описание этих аномалий непосредственно связано со структурой физического вакуума: с постоянным рождением и уничтожением виртуальных частиц-переносчиков взаимодействий.

		
1957 год	 	Чжэнин Янг и Чжэндао Ли, совместно, «за предвидение при изучении так называемых законов четности, которое привело к важным открытиям в области элементарных частиц» Эти результаты касаются общих законов сохранения при ядерных реакциях.
1959 год	 	Эмилио Джино Сегре и Овен Чемберлэн, «за открытие антипротона»

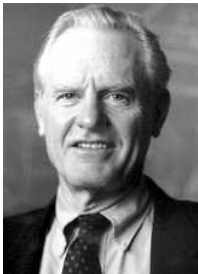
1960 год		Дональд Артур Глейзер, «за изобретение пузырьковой камеры». Это изобретение ещё одного метода регистрации частиц. Необходимость появления нового метода была связана с переходом в область высоких энергий частиц, так что для наблюдения полного трека частицы в разреженной среде камеры Вильсона размер камеры по оценкам должен был бы достигать 100м! В перегретой жидкости пузырьковой камеры частица тормозится быстрее, след частицы наблюдается как пузырьки пара, возникающие по траектории частицы.
1960 год (химия)		Виллард Фрэнк Либби, «за его метод использования углерода-14 для определения возраста в археологии, геологии, геофизике и других областях науки».
1961 год	 	Роберт Хофшадтер, 1/2 премии, «за его пионерские исследования рассеяния электронов на атомном ядре и достигнутые таким образом результаты, касающиеся структуры нуклонов», и Рудольф Людвиг Мессбауэр, 1/2 премии, «за его исследования в области резонансного поглощения гамма-радиации и открытие эффекта, носящего его имя» В опытах Хофштадера, начатых в 1950 в Стэнфорде, исследовалось рассеяние электронов с энергией до миллиарда электронвольт на ядрах. Опыты позволили заглянуть в структуру ядра, определить как меняется распределение нуклонов в тяжёлых ядрах, оценён размер нейтрона. Эффект Мессбауэра связан с излучением/поглощением гамма-кванта без отдачи, импульс фотона передается в таком процессе всему кристаллу, что приводит к очень маленькой ширине линии излучения. Гамма-квант соответствует перепходам между ядерными уровнями. Изучение особенностей мессбауэровского спектра позволяет извлечь информацию о структуре ядра.

1963 год	  	Эжен Пол Вигнер, 1/2 премии, «за его вклад в теорию атомного ядра и элементарных частиц и в особенности за открытие и применение фундаментальных законов симметрии», и Мария Гопперт Майер и Дж.Ханс Д.Енсен, совместно 1/2 премии, «за их открытия, касающиеся ядерной оболочечной структуры».
1965 год	  	Шин-Итиро Томонага, Юлиан Швингер и Ричард П.Фейнман, совместно, «за их фундаментальную работу в квантовой электродинамике, имеющую важнейшее значение для физики элементарных частиц». Эти результаты позволили построить квантовую электродинамику, развили концепцию виртуальных частиц-переносчиков взаимодействий, сформировали современный формализм физики элементарных частиц.
1967 год		Ханс Альбрехт Бете, «за его вклад в теорию ядерных реакций, в особенности за его открытия, связанные с производством энергии в звёздах».

1968 год		Луис Вальтер Альварес, «за его определяющий вклад в физику элементарных частиц, в частности за открытие большого числа резонансных состояний, что стало возможным благодаря развитой им техники водородной пузырьковой камеры и методов анализа данных». Альварес развил технику пузырьковой камеры, применив в качестве жидкости жидкий водород (температура около 20К). Эта техника позволила обнаружить очень короткоживущие частицы.
1969 год		Мюррэй Гелл-Ман, «за его вклад и открытия в классификации элементарных частиц и их взаимодействия» В том числе, Гелл-Ман предложил кварковую модель строения частиц.
1975 год	  	Оге Нильс Бор, Бен Рой Моттelson и Лео Джеймс Рейнуотер, совместно, «за открытие связи между коллективным движением и движением частиц в атомном ядре и за развитие основанной на этой связи теории атомного ядра» Эти работы продолжили развитие понимания структуры атомного ядра, развивая оболочечную модель и рассматривая динамику движения нуклонов в ядре.
1976 год		Бартон Рихтер и Самюэль Чо Чунг Тинг, совместно, «за их пионерские работы в открытии нового вида тяжёлых элементарных частиц». В экспериментах, предпринятых одновременно на Стэнфордском линейном ускорителе и в Брукхэвенской национальной лаборатории (обе в США) было обнаружено формирование в столкновении энергетичных электрона и позитрона субатомной частицы джи-пси-мезона с массой покоя 3097МэВ. Это открытие фактически было открытием нового

		типа кварков (было известно три типа кварков: «верхний», «нижний», «странный», а в этих опытах проявилось связанное состояние «очарованных» кварка и антикварка).
1979 год	  	Шелдон Ли Глашоу, Абдус Салам, Стивен Вайнберг, совместно, «за их вклад в теорию объединения слабого и электромагнитного взаимодействий между элементарными частицами, включая, среди прочего, предсказание нового нейтрального тока».
1980 год	 	Джеймс Ватсон Кронин и Вал Логсдон Фитч, совместно, «за открытие нарушения фундаментальных принципов симметрии в распаде нейтральных К-мезонов».

1984 год	 	Карло Руббиа и Симон ван дер Меер, совместно, за их определяющий вклад в большой проект, приведший к открытию полевых частиц W и Z, являющихся переносчиками слабого взаимодействия».
----------	---	--

1988 год	  	Леон М.Ледерман, Мелвин Шварц и Джек Штейнберг, совместно, «за метод пучка нейтрино и за демонстрацию дублетной структуры лептонов посредством открытия мюонного нейтрино». Лауреаты впервые получили нейтрино искусственно (до этого доступным источником нейтрино было Солнце и другие космические источники). Кроме того, они показали, что помимо известного к тому моменту электронного нейтрино существуют мюонные нейтрино, что приводит к фундаментальному различию в процессах с участием электронов и мюонов (и это различие сформулировано как «дублетная структура лептонов» в формулировке заслуг лауреатов).
1990 год	  	Джером И. Фридман, Генри У. Кендал и Ричард Э. Тэйлор, совместно, «за их пионерские исследования в области глубокого неупругого рассеяния электронов на протонах и связанных нейтронах, которые были принципиально важны для развития кварковой модели в физике частиц».
1992 год		Жорж Шарпак, «за развитие и изобретение детекторов частиц, в частности многопроволочной пропорциональной камеры». Многопроволочная камера схематически похожа на известный всем счётчик Гейгера, но включает в себя множественные проволочные аноды, что позволяет определять и место пролёта частицы.

1995 год.	 	Мартин Л.Перл, 1/2 премии, «за открытие тау-лептона», и Фредерик Рейнз «за обнаружение нейтрино»
2004 год		Дэвид Д.Гросс, Х.Дэвид Полицер и Франк Вилчжек, совместно, «за открытие асимптотической свободы в теории сильного взаимодействия». Лауреатами была разработана теория взаимодействия кварков друг с другом.

	 	
2008 год	  	Ёичиро Намбу, 1/2 премии, «за открытие механизма спонтанного нарушения симметрии в субатомной физике», и Макото Кобаяши, Тошихиде Маскава, совместно по 1/4 премии, «за открытие нарушенной симметрии, которая предсказывает наличие по меньшей мере трёх кварковых семейств в природе»
2013	 	Франсуа Энглер и Питер Хиггс, в равных долях, «за теоретическое открытие механизма, приводящего к пониманию механизма появления масс у субатомных частиц, который был недавно подтверждён обнаружением предсказанной фундаментальной частицы в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере ЦЕРН»
2015	 	Такаакт Каджита и Артур Б. Макдональд, в равных долях, «за открытие нейтринных осцилляций, которые показывают существование массы у нейтрино»

Строение атомов.

Строение атома рассматривается более подробно в курсе квантовой физики [7]. Вспомним вкратце основные результаты.

Атомы состоят из компактного положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена основная масса атома, и электронов, занимающих квантовомеханические состояния — орбитали, характерный размер области, занимаемой электронами — доли ангстрема.

Классической аналогией этих квантовых состояний является движение электрона по орбите вокруг ядра. Эта аналогия и правило квантования Бора $p \cdot 2\pi r = n\hbar$ позволяют получить уровни энергии электрона в водородоподобном атоме и линейчатые спектры поглощения:

$$\begin{aligned} m a_u &= k \frac{Ze^2}{r_n^2} \\ m \frac{V^2}{r_n} &= k \frac{Ze^2}{r_n^2} \\ p_n^2 r_n &= k m Ze^2 \\ r_n &= \frac{(p_n r_n)^2}{k m Ze^2} = n^2 \frac{\hbar^2}{k m Ze^2} \\ p_n &= \frac{k m Ze^2}{n \hbar} \\ E_n &= \frac{p_n^2}{2m} - k \frac{Ze^2}{r_n} = -\frac{1}{2} \frac{k^2 m Z^2 e^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2} \end{aligned}$$

Из найденных дискретных значений энергии получаем дискретный набор частот поглощения и излучения при переходах между этими уровнями:

$$h \nu_{mn} = |E_m - E_n| = |E_1| \cdot \left| \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right|$$

Характерный масштаб энергии в задаче об атоме водорода $E_1 = -13.6 \text{ эВ}$. Для сложного атома при рассмотрении задачи об уровнях энергии внешних электронов можно, в качестве первого приближения, рассматривать ядро и все внутренние электронные оболочки как единый заряд. Поэтому тот же масштаб энергии (единицы и десятки электронвольт) является типичным для процессов, связанных с внешними электронами: ионизации (рис. 1, [8]), формирования химической связи.



Рисунок 1: Зависимость энергии ионизации от атомного номера элемента С сайта [8].

Более строгое решение задачи о водородоподобном атоме включает учёт запрета Паули для электронов (только два электрона, с разным направлением собственного момента вращения — спина, могут находиться в одном состоянии (условно говоря, на одной орбите)) и правила квантования момента импульса электрона.

Оказывается, что форма пространственного распределения электронной волновой функции (связанной с вероятностью обнаружить электрон в данном месте) в водородоподобном атоме полностью определяется тремя квантовыми числами: главным квантовым числом $n=1,2,3\dots$, определяющим энергию, значением момента импульса, выраженным в единицах постоянных Планка $\hbar=h/(2\pi)$ $l=0,\dots,n-1$, и проекцией момента импульса $m=-l,-l+1,\dots,l-1,l$. Это пространственное распределение часто приводится в виде наглядных изображений в литературе (например, [9], рис. 2). Необходимо, однако, иметь в виду некоторую условность этих изображений: волновая функция не имеет чёткой границы в пространстве и, хотя и быстро затухая, простирается вообще говоря на сколь угодно большое расстояние от ядра. Наглядные рисунки (сферическое распределение волновой функции для s-орбитали, «восьмёрки» для p-орбитали) показывают некоторые особенности устройства этих решений, но не являются точным представлением решения задачи о движении соответствующего электрона в атоме. Точно вычисленные профили волновой функции электрона в водородоподобном атоме (см., например, [10]) в различных состояниях показаны на рисунке 3.

	$s (l=0)$	$p (l=1)$			$d (l=2)$					$f (l=3)$						
	$m=0$	$m=0$	$m=\pm 1$		$m=0$	$m=\pm 1$		$m=\pm 2$		$m=0$	$m=\pm 1$	$m=\pm 2$		$m=\pm 3$		
	s	p_z	p_x	p_y	d_{z^2}	d_{xz}	d_{yz}	d_{xy}	$d_{x^2-y^2}$	f_{z^3}	f_{xz^2}	f_{yz^2}	f_{xyz}	$f_z(x^2-y^2)$	$f_x(x^2-3y^2)$	$f_y(3x^2-y^2)$
$n=1$																
$n=2$																
$n=3$																
$n=4$																
$n=5$										...	...	...	...	...	...	...
$n=6$					...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$n=7$		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Рисунок 2: Схематическое изображение пространственной симметрии волновых функций электрона в водородоподобном атоме. Цвет показывает знак волновой функции. С сайта [9].

Для сложного атома необходимо учитывать взаимодействие между электронами, которое приводит к различию энергий между состояниями с одним n и различными l и определяет порядок заполнения уровней (а также приводит к небольшим смещениям и расщеплениям спектральных линий). Как мы видели, при этом естественным образом воспроизводится структура периодической таблицы Менделеева (2 элемента первого периода, длина малого периода в 8 элементов, 10 d-элементов, 14 лантаноидов).

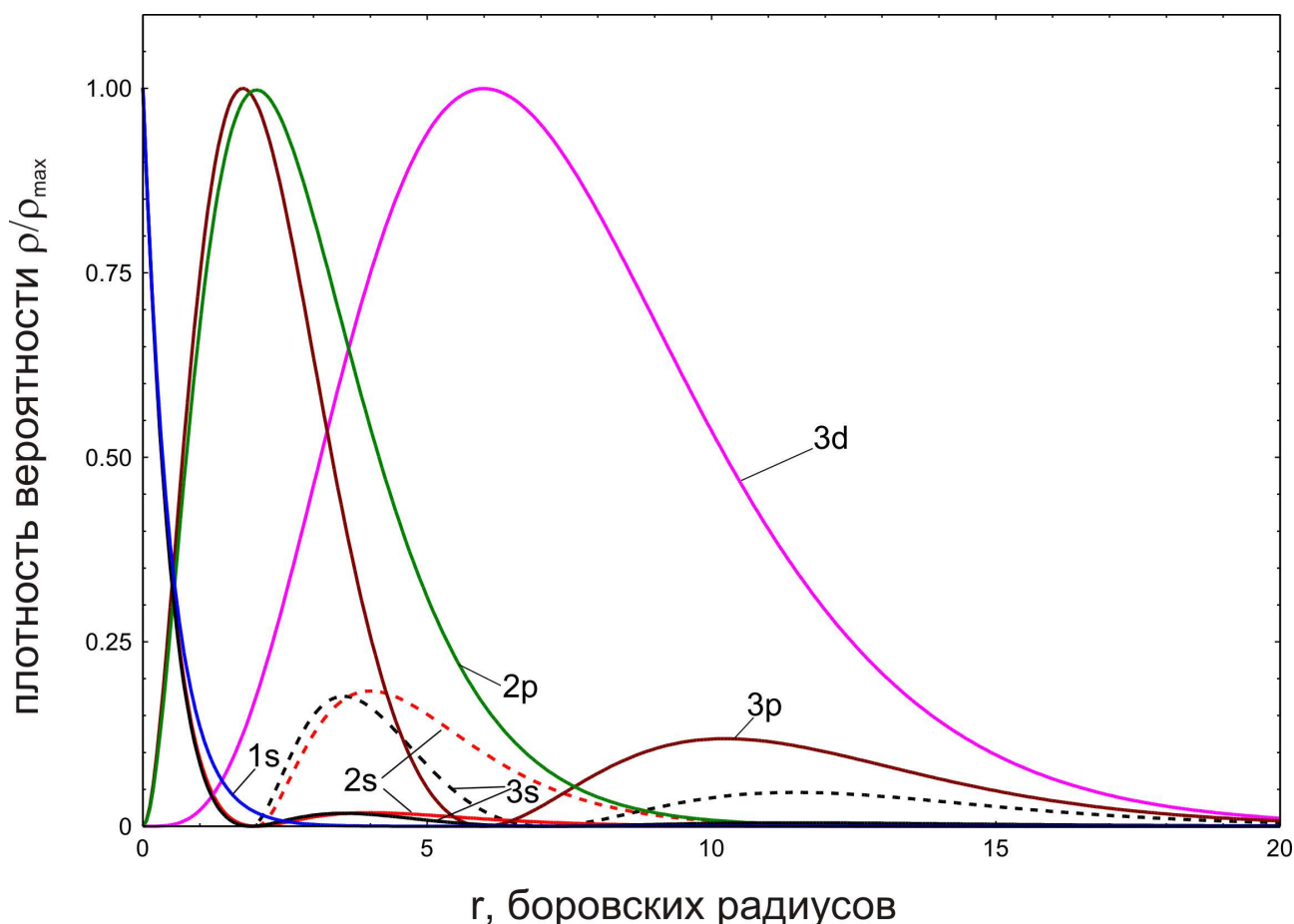


Рисунок 3: Зависимость плотности вероятности обнаружения электрона от расстояния до ядра в водородоподобном атоме для разных электронных состояний. Плотность вероятности на рисунке отнормирована на максимальное для данного состояния значение для наглядности. Для анизотропных p и d состояний подразумевается удаление от центра по произвольно зафиксированному радиусу. Пунктирными кривыми показаны десятикратно увеличенные фрагменты графиков для $2s$ (красный) и $3s$ (чёрный) состояний. Вычисление по формулам из [10].

Линейчатые спектры атомов. Спектры характеристического рентгеновского излучения.

Как мы уже разобрали при изучении водородоподобного атома [7], дискретность спектров испускания/поглощения атомов связана с дискретностью уровней энергии. В модели боровского водородоподобного атома энергия кванта электромагнитного излучения испускаемого или поглощаемого при переходе между n -ым и m -ым уровнем равна

$$h \nu_{mn} = |E_m - E_n| = |E_1| \cdot \left| \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right|, \text{ где } |E_1| \simeq Z^2 \times 13.6 \text{ эВ}, \quad Z — \text{ заряд ядра. Для оценки}$$

отметим, что длина волны, соответствующая энергии кванта электромагнитного излучения в 1 эВ , равна примерно 1230 нм , а видимой области спектра соответствует излучение с энергией кванта $2\text{--}3 \text{ эВ}$. Полный же спектр электромагнитного излучения гораздо шире видимого диапазона [11]: он включает как более длинноволновое излучение (с менее энергичными квантами) в инфракрасной части спектра или даже в области радиоволн, так и коротковолновое (с более энергичными квантами) ультрафиолетовое и рентгеновское излучение (рисунок 4).

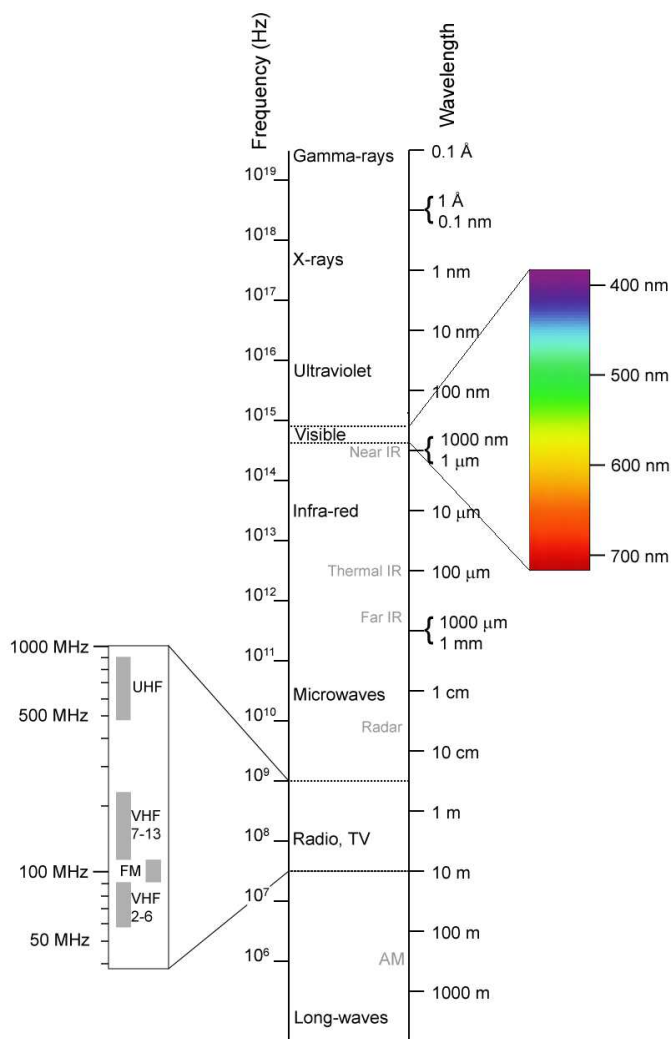


Рисунок 4: Спектр электромагнитного излучения. С сайта [11].

в первом приближении можно считать, что внешние электроны создают заряженный шаровой слой *вне* орбиты внутреннего электрона и электрическое поле внутри этого слоя ими не создаётся. Для оценки энергии ионизации самой нижней 1s оболочки можно, таким образом, воспользоваться формулой для атома водорода $|E_0| \approx Z^2 \times 13.6 \text{ эВ}$. Таким образом, в атомах с $Z \approx 10$ энергия ионизации электронов 1s оболочки может составлять $\sim 1000 \text{ эВ}$, а кванты электромагнитного излучения при переходе с участием такого электрона характеризоваться длиной волны $\sim 1 \text{ нм}$, то есть лежать в рентгеновской области спектра. Действительно, измеренные энергии электронов внутренних оболочек [12] оказываются такого порядка величины.

На рисунке 5 показана зависимость энергии ионизации от заряда ядра для 1s, 2s и 3s оболочек первых 40 элементов таблицы Менделеева. Интересно отметить, что используя известный нам результат для уровней энергии водородоподобного атома и наглядные соображения об экранировке ядра внутренними электронами можно получить достаточно разумные оценки энергии электронов на внутренних 1s, 2s и 3s оболочках тяжёлых атомов. Рассматривая 2s и 3s оболочки надо положить главное квантовое число n равным 2 или 3 соответственно. Кроме этого, надо учесть экранировку заряда ядра, для чего необходимо учесть радиальные распределения плотности вероятности нахождения электрона на разных

Отдельный интерес представляет получение высокоэнергичного излучения за пределами видимой части спектра. Максимально возможная энергия кванта излучаемого или поглощаемого атомом в модели Бора равна энергии ионизации $|E_0| \approx Z^2 \times 13.6 \text{ эВ}$. Таким образом, в атоме водорода минимальная возможная длина волны составляет около 100 нм и соответствует ультрафиолетовой области спектра¹. Это в принципе определяет максимальный масштаб энергии кванта, испускаемого или поглощаемого при переходе внешнего электрона между уровнями: даже при большом заряде ядра электроны внутренних оболочек частично экранируют заряд ядра и, в полном соответствии с законами электростатики, внешний электрон «чувствует» только суммарный заряд, заключённый внутри его орбиты.

Переходы с более высокими энергиями кванта излучения можно получить если задействовать электроны нижних оболочек. Для этих оболочек экранирование ядра гораздо слабее, а для самой нижней оболочки оно и вовсе отсутствует. Действие же электрического поля внешних электронов ослабляется теми же законами электростатики: в

¹ Напомним, что видимые спектральные линии для водорода (линии Бальмера) соответствуют переходам со второго энергетического уровня ($n=2$, $m \geq 3$).

расстояниях от ядра. Как видно из рисунка 3, максимум плотности вероятности для p состояния оказывается ближе к ядру, чем максимум плотности вероятности для соответствующего s состояния. Ну и конечно s состояние с меньшим квантовым числом оказывается «внутри» состояния с большим квантовым числом¹. Таким образом, для $2s$ состояния мы должны в первом приближении уменьшить заряд ядра на 8 (2 экранирующих электрона на $1s$ уровне и 6 на $2p$), а для $3s$ состояния — на 16 (добавляются 2 $2s$ электрона и 6 $3p$ электронов), а начиная с 21 элемента начинать учитывать и эффект $3d$ электронов. Соответствующие модельные кривые приведены на рисунке 5, они оказываются достаточно близки к экспериментальным значениям. Для $1s$ оболочки измеренная энергия ионизации оказывается чуть меньше нашего простого модельного расчёта, что естественно объясняется небольшой экранировкой центрального заряда остальными электронами (как проиллюстрировано на рисунке 3, для них есть небольшая вероятность оказаться достаточно близко к ядру, чтобы попасть «внутрь» $1s$ оболочки).

Этими рассуждениями мы практически воспроизвели закон Мозли: энергия электрона на глубоких (близких к ядру) атомных уровнях равна $E = -\frac{|E_0|}{n^2} (Z - \sigma_n)^2$, где σ_n — постоянная экранирования для данного уровня, показывающая сколько электронов атома «в среднем» оказывается внутри орбиты интересующего нас электрона.

Таким образом, энергии электронов на внутренних оболочках оказываются достаточными, чтобы приводить к появлению линий спектров излучения и поглощения в рентгеновском диапазоне. Исторически при этом сложилась ещё одна схема нумерации уровней энергии, низлежащие уровни обозначают заглавными латинскими буквами: К для $1s$ оболочки, L для $2s$ и $2p$ оболочек, М для оболочек с $n=3$, N для оболочек с $n=4$. Схематическое изображение уровней энергии, соответствующих внутренним оболочкам атома, и возможных переходов, приводящих к излучению рентгеновского кванта, показана на рисунке 6. Переходы обозначают буквой, соответствующей уровню с которого электрон уходит при поглощении кванта и греческой буквы с индексом, маркирующей конкретный переход.

¹ Конечно, эти рассуждения упрощают реальное распределение электронов в атоме. Как мы уже обсуждали, плотность вероятности обнаружить электрон в какой-то точке является непрерывной (и вообще говоря достаточно широко распределённой) функцией. Поэтому имеет смысл говорить только о том, что в среднем некоторое количество электронов оказывается ближе к ядру, чем интересующий нас электрон. Однако более строгое рассмотрение этой задачи существенно выходит за рамки курса.

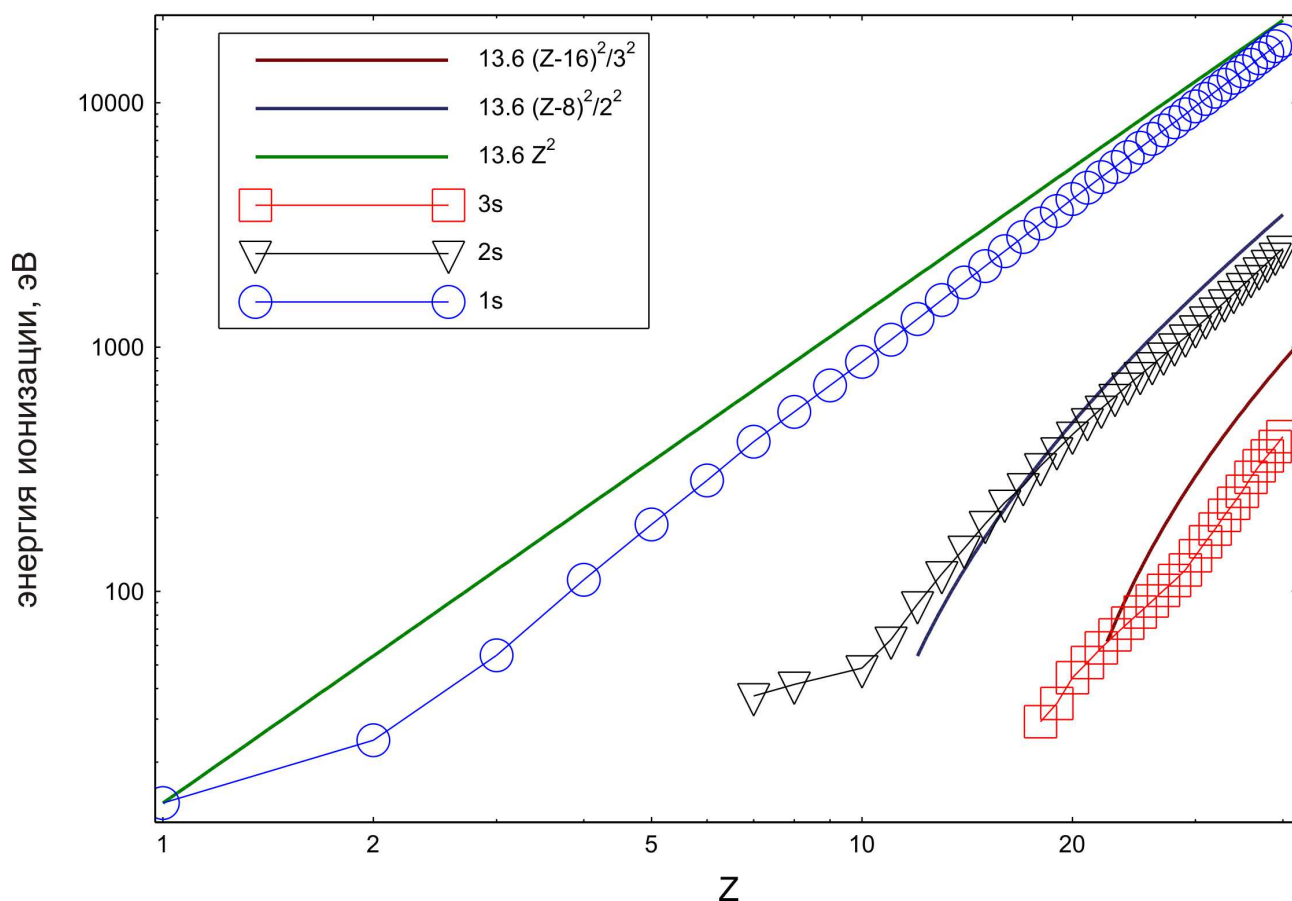


Рисунок 5: Энергии ионизации электронов на 1s, 2s и 3s оболочках для первых 40 элементов. Данные (символы) из [12], кривые - модельные оценки, см. текст.

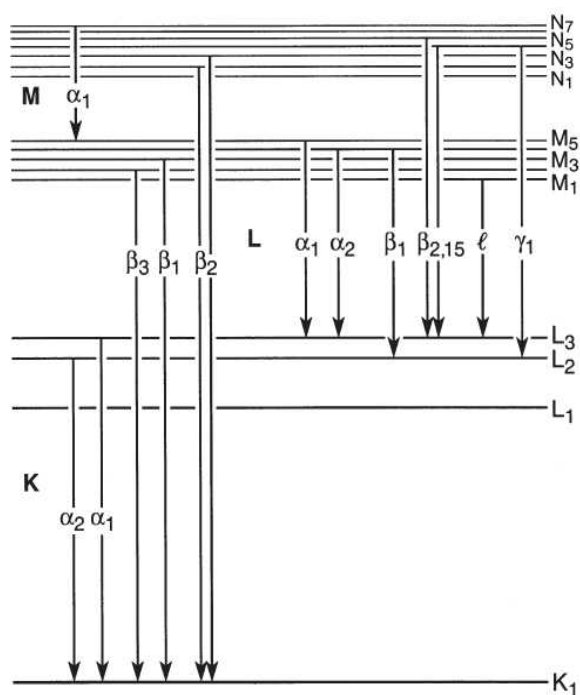


Рисунок 6: Схема переходов между внутренними оболочками атома. Из [12].

Энергии и относительные интенсивности различных линий специфичны для разных элементов и изотопов (за обнаружение чего, в частности, была присуждена Нобелевская премия по физике 1917 года Ч.Г.Баркла, и в 1924 году К.М.Г.Зигбану), что позволяет использовать их для идентификации элементов (рисунок 7. Эти спектральные линии называют характеристическим рентгеновским излучением, оно впервые было обнаружено Г.Мозли в 1913 году (см., например, [13]). Это же свойство позволяет получать рентгеновское излучение определённой длины волны подбором материала анода, бомбардируемого электронами в рентгеновской трубке. Например, в широко используемой в простых кристаллографических приборах трубке с медным анодом получается излучение с энергией кванта 8.048 и 8.028 кэВ для близких линий $K-\alpha_1$ и $K-\alpha_2$ соответственно (длина волны около $1.5\text{\AA}$).

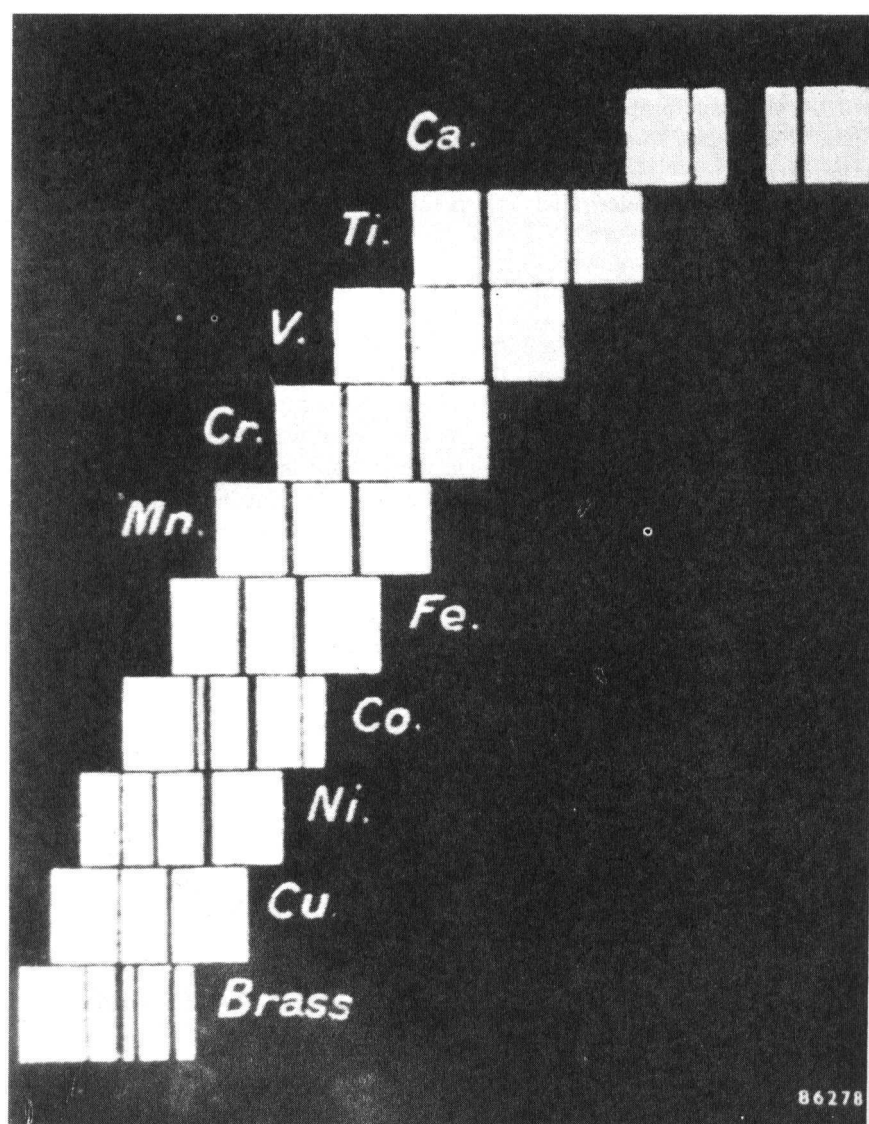


Рисунок 7: Серия фотопластинок с записью линий характеристического рентгеновского излучения разных материалов из работы Г.Мозли (1913). Пластинки смещены по горизонтали, чтобы положение линий соответствовало одной шкале длин волн, длина волны растёт слева направо. Обратите внимание на интенсивную линию меди в спектре характеристического излучения латуни (англ. brass, сплав меди и цинка). Линии с разной длиной волны разрешены благодаря дифракции на кристалле жёлтой кровяной соли $K_4[Fe(CN)_6]$. С сайта [13].

Можно отметить ещё одно имеющее важный физический смысл отличие схемы переходов на рисунке 6 от привычной школьной картины, когда в атоме водорода рассматривается переход электрона между любой парой уровней. Например, на этом рисунке нет перехода между K и L₁ (1s и 2s) состояниями. Это связано с тем, что при переходах должен выполняться не только закон сохранения энергии (то есть, энергия излучаемого кванта должна быть равна разности энергии уровней), но и закон сохранения момента импульса. При этом, так как взаимодействие рентгеновского кванта и электрона происходит за счёт электрического поля электромагнитной волны (взаимодействие магнитного поля с магнитным моментом электрона гораздо слабее), то оказывается важен только орбитальный момент электрона до и после перехода (он определяет форму электронного облака — то есть пространственное распределение заряда), а спиновый момент электрона при переходе остаётся неизменным. Квант электромагнитного излучения имеет момент импульса, равный 1 (в единицах $\hbar$). Значит и момент импульса электрона при переходе должен меняться на 1, а в s-состоянии он всегда равен нулю. Таким образом, закон сохранения момента импульса запрещает переход между этими состояниями. Аналогичная ситуация будет нам встречаться и в других задачах. Вообще говоря, в квантовой механике действует такое правило: любой процесс возможен с некоторой вероятностью, если только он не запрещён одним из законов сохранения.

Завершая рассказ о физике рентгеновского излучения, отметим один терминологический вопрос о различии рентгеновского и гамма-излучений. Это достаточно условное деление, часто гамма-излучением называют все электромагнитные волны с длиной волны менее 0.1 Å. Другим определением является следующее: рентгеновское излучение — это излучение, связанное с переходами между электронными уровнями энергии в атоме, а гамма-излучение — с переходами между ядерными уровнями. Так как, как мы обсудим далее, существуют и рентгеновские источники с непрерывным спектром излучения, это определение также не универсально. Эта разница, однако, чисто терминологическая и физически не принципиальна — и рентгеновское и гамма-излучение являются электромагнитным излучением и с точки зрения физики полностью характеризуются длиной волны или, что то же самое, энергией кванта.

Получение и применение рентгеновского излучения.

В связи с тем, что рентгеновское излучение применяется во многих научных, технических и медицинских задачах, рассмотрим вкратце вопрос получения и применения рентгеновского излучения. С рентгеновским излучением так или иначе связаны не менее 8 Нобелевских премий:

- Вильгельм Ренген, 1901 год, за открытие
- Макс фон Лауэ, 1914 год, за открытие рентгеновской дифракции на кристаллах
- Чарльз Баркла, 1917 год, за открытие характеристического излучения
- Карл Зигбан, 1924 год, за открытие связи рентгеновских спектров с внутренней структурой атомов
- Фрэнсис Крик, Джеймс Ватсон и Морис Вилкинс, 1962 год (физиология и медицина), за открытие спиральной структуры ДНК.
- Дороти Ходжкин, 1964 год (химия), за расшифровку при помощи рентгеноструктурного анализа структуры органических молекул (пенициллина, инсулина)
- Рикардо Джаакони, 2002 год (1/2 премии), за открытие космических источников

рентгеновского излучения

- Дэн Шехтман, 2011 год (химия), за открытие квазикристаллов.

Источники рентгеновского излучения.

Традиционным лабораторным источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, в которой поток электронов бомбардирует анод-мишень. Типичное значение ускоряющей разности потенциалов составляет 20-150кВ. В том случае, если электрону из пучка удастся выбить один из внутренних электронов атома мишени, при заполнении образовавшейся вакансии внешний электрон «проваливается» на внутреннюю оболочку, а разница энергий выходит в виде кванта излучения. Этот механизм приводит к формированию характеристического рентгеновского излучения на дискретных длинах волн.

Другим механизмом, также работающим в рентгеновской трубке, является так называемое тормозное излучение [14]: при ускоренном движении (в данном случае — в поле ядра, если бомбардирующий электрон проник достаточно глубоко в атом) электрон излучает энергию в форме электромагнитных волн. В результате кинетическая энергия электрона переходит в энергию квантов электромагнитного излучения. Так как дискретных уровней энергии при этом нет, то таким образом удастся получить непрерывный спектр рентгеновского излучения (рисунок 8). Минимальная достижимая длина волны ограничивается энергией электронов в пучке. Так как для получения рентгеновского излучения необходимо проникновение электрона вглубь атома, избегая взаимодействия с внешними электронами, только небольшая доля электронов участвует в генерации рентгеновского излучения. Поэтому КПД рентгеновской трубки мал, типичные значения составляют 0.1-3%. Основная часть энергии пучка идёт на нагрев анода, который обычно постоянно охлаждается водой.

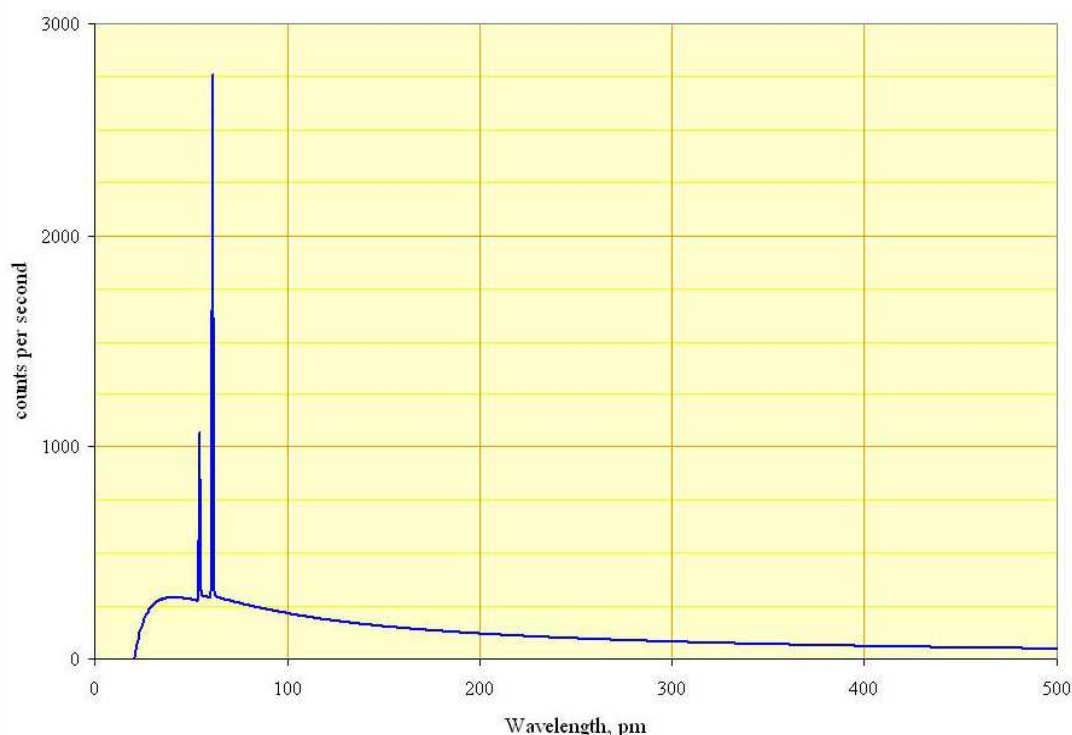


Рисунок 8: Спектр рентгеновского излучения в трубке с родиевым анодом при энергии электронов 60кВ. С сайта [14].

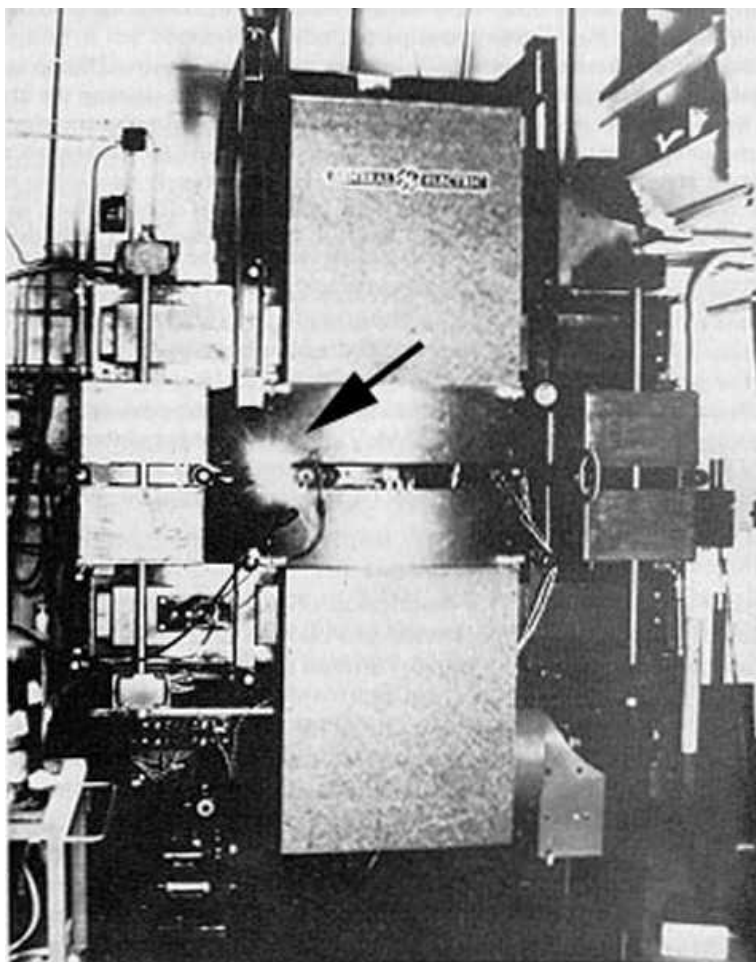


Рисунок 9: Излучение синхротрона General Electric. Фотография 1946 года. Стрелка показывает наблюдаемое излучение. С сайта [15].

Другим лабораторным методом получения рентгеновского излучения является синхротронное излучение [15]. Это излучение было достаточно случайно обнаружено в 1946 году американскими физиками Элдером, Гуревичем, Лангмюиром и Поллоком (рисунок 9). В синхротроне заряженные частицы (электроны) движутся по круговой орбите, задаваемой полем отклоняющих магнитов. Такое движение является ускоренным, а поэтому, в полном согласии с классической электродинамикой, электроны должны излучать электромагнитные волны. При увеличении энергии электронов это излучение можно сместить в рентгеновскую область спектра. По сравнению с рентгеновской трубкой синхротрон обладает рядом преимуществ: на несколько порядков большая яркость излучения (что позволяет исследовать более слабые эффекты), направленность и поляризация излучения, возможность перестраивать длину волны излучения в широком диапазоне, возможность получения коротких (наносекундных) импульсов излучения. Эти свойства

делают синхротронное излучение мощным инструментом современных научных и технологических исследований. Однако по сравнению с рентгеновской трубкой, являющейся «настольным» источником излучения, для получения синхротронного излучения нужен собственно синхротрон, являющийся отдельным высокотехнологичным сооружением.



Рисунок 10: Кольцо синхротрона ESRF в Гренобле (Франция). С сайта [16].

В качестве примера источника синхротронного излучения можно привести научный центр ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, Европейский центр синхротронного излучения) в Гренобле (Франция) [16], [17] (рисунок 10). Это сооружение финансируется 12 европейскими странами, основную нагрузку взяли на себя Франция, Германия, Италия и Великобритания. Бюджет 2010 года составил 98 миллионов евро. На синхротроне постоянно работают

около 600 человек и около 7000 исследователей со всего мира приезжают ежегодно для участия в экспериментах. Само кольцо синхротрона имеет длину окружности более 800

метров, то есть более 200 метров в диаметре. Энергия электронов в кольце до 6ГэВ. По кольцу распределены 40 «линий» - мест, в которых предусмотрен выход излучения для его дальнейшего использования в эксперименте. Эти «линии» рассчитаны на разные части рентгеновского спектра от мягкого (менее 1кэВ) до жёсткого (более 30кэВ) и на разные особенности исследований. В течение некоторого времени для передвижения вдоль кольца предоставлялись велосипеды, к сожалению эта практика прекратилась после нескольких столкновений с участием велосипедистов.

Подобные установки есть и в других странах (см. список [18]). Около 10 синхротронных источников излучения находится в Японии и США. В России имеются источники синхротронного излучения в Курчатовском институте и в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера в Новосибирске, а также два строящихся источника в Дубне и Зеленограде.

Кроме перечисленных лабораторных источников можно отметить и природные источники рентгеновского излучения. Это в первую очередь астрономические источники: излучение вырывающееся из окрестностей чёрных дыр, образующееся при взрывах сверхновых, пульсары. Также рентгеновское излучение образуется в разогретых ядрах звёзд (напомним, что энергия в 1кэВ соответствует температуре примерно 10 миллионов градусов). Происхождение рентгеновского излучения от астрономических источников может быть как термическим (что требует температур в десятки миллионов градусов), так и аналогичным синхротронному излучению: из-за движения быстрых электронов в сильном магнитном поле звезды.

Детектирование рентгеновского излучения.

Рентгеновское излучение лежит вне видимого спектра. Есть некоторые свидетельства первых исследователей (Рентгена и Брэнда), что привыкший к темноте глаз замечает присутствие мягкого рентгеновского излучения как слабое свечение, кажется исходящее из глаза. Вероятно, это может быть связано с ионизационным действием рентгеновского излучения на ткани глаза (и автор предостерегает читателя от повторения этого опыта). Прохождение мощного пучка рентгеновского излучения может быть зафиксировано визуально по свечению ионизованного газа [19] (рисунок 11).

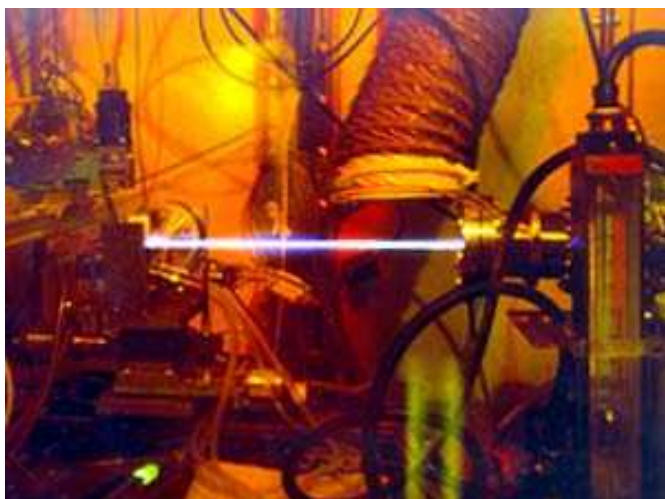


Рисунок 11: Излучение ионизованного газа на пути мощного пучка рентгеновского излучения, линия ID11 источника синхротронного излучения ESRF. С сайта [19].

На ионизационном действии рентгеновского излучения основано использование счётчиков Гейгера и их аналогов для обнаружения излучения.

Исторически для обнаружения рентгеновских лучей использовались фотопластинки и фотоплёнки. Механизм образования изображения при этом такой же как и в видимом диапазоне. Попадание кванта света на связанное (обычно с галогеном) серебро приводит к восстановлению металлического серебра, которое и формирует изображение, проявляющееся при дальнейшей химической обработке.

Кроме этого используется в разных формах явление люминесценции. Существуют вещества (например, NaI), которые при

облучении рентгеновским излучением излучают фотоны в видимой части спектра. Эти вторичные фотоны могут быть зафиксированы глазом, фото или видео техникой, фотоэлектронным умножителем.

Наконец, существуют твердотельные полупроводниковые датчики излучения. Это, фактически, включённые с запертым р-п-переходом диоды. При попадании кванта излучения в кристалл детектора рождается электрон-дырочная пара, дающая импульс тока через диод.

Рентгеновская оптика.

В качестве небольшого отступления заметим, что из-за большой энергии рентгеновских квантов практически невозможно сделать оптическую линию «классического» типа для перевода излучения от источника к исследуемому объекту. Однако есть одно интересное свойство рентгеновских лучей, которое позволяет всё же до некоторой степени управлять пучком излучения. Это свойство выражается в том, что фазовая скорость рентгеновского излучения в среде больше скорости света в вакууме (напомним, что теория относительности запрещает передачу информации со скоростью большей скорости света, а это соответствует групповой, а не фазовой скорости волны). То есть, для рентгеновского излучения показатель преломления сред оказывается чуть меньше 1. Поэтому, при падении на поверхность среды под очень небольшим углом, рентгеновское излучение может испытывать «полное внешнее отражение». По этому принципу можно также сделать фокусирующее параболическое зеркало, но для этого придётся использовать почти плоский фрагмент на боковой поверхности параболоида.

Применения рентгеновского излучения.

Во-первых, это всем нам известное медицинское применение. Различные ткани обладают разной поглощающей способностью (мягкие ткани содержат много лёгких элементов: водорода, кислорода, углерода, в костных тканях велико содержание более тяжёлых кальция и магния), поэтому получение рентгеновского изображения используется при диагностике переломов, в стоматологии. Первая полученная рентгеновская фотография — это знаменитая «рука с кольцами», фотография руки жены В.Рентгена, сделанная им в 1895 году [20]. Введением в организм контрастного вещества (с пищей или другим образом) можно дополнительно выделить, например пищеварительные органы.

Второе важное, хотя и связанное больше с научными лабораториями, применение — это рентгеноструктурный анализ [21][22]. Так как длина волны рентгеновского излучения сравнима с межионным расстоянием в кристалле (ангстремы), то любой упорядоченный кристалл является своеобразной дифракционной решёткой для рентгеновского излучения. Если выделить в кристалле ионы, занимающие позиции в семействе параллельных плоскостей (рисунок 13), то можно найти направление, в котором волны, рассеянные разными плоскостями, распространяются в фазе.



Рисунок 12: "Рука с кольцами".

Сделанная В.Рентгеном рентгеновская фотография руки его жены. 22 декабря 1895 года. С сайта [20].

Обычно угол рассеяния (технически — местоположение детектора) выбирают равным углу падения (определяется взаимным расположением источника и образца). Условие дифракционного максимума при этом $2d \sin \theta = n \lambda$. Так как таких плоскостей в кристалле можно выделить много (например, на рисунке 13 их можно провести не горизонтально, а по диагонали рисунка), то перемещая образец и детектор относительно источника можно получить набор дифракционных максимумов, который содержит полную информацию о пространственной структуре кристалла (хотя в сложных случаях для расшифровки структуры требуется помощь компьютера). За открытие этого явления Макс фон Лауэ был удостоен Нобелевской премии по физике 1914 года с формулировкой «за открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах».

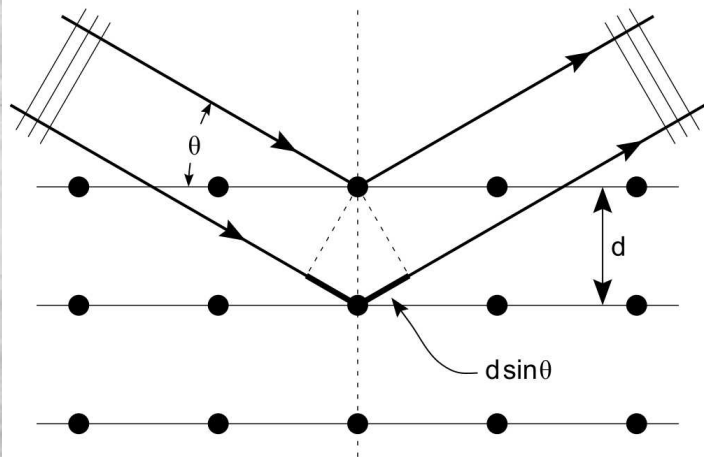


Рисунок 13: Схема дифракции плоской волны рентгеновского излучения на кристаллической решётке. С сайта [21].

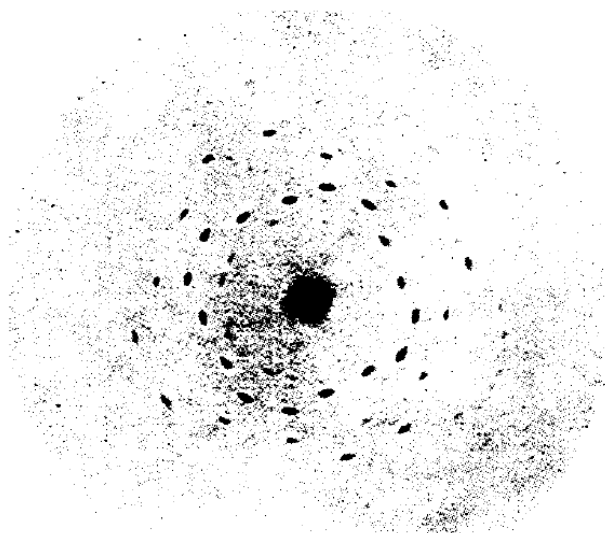


Рисунок 14: Дифракционная картина рентгеновских лучей на кристалле медного купороса. 1914 год, рисунок из нобелевской лекции М.Лауэ. С сайта [6].

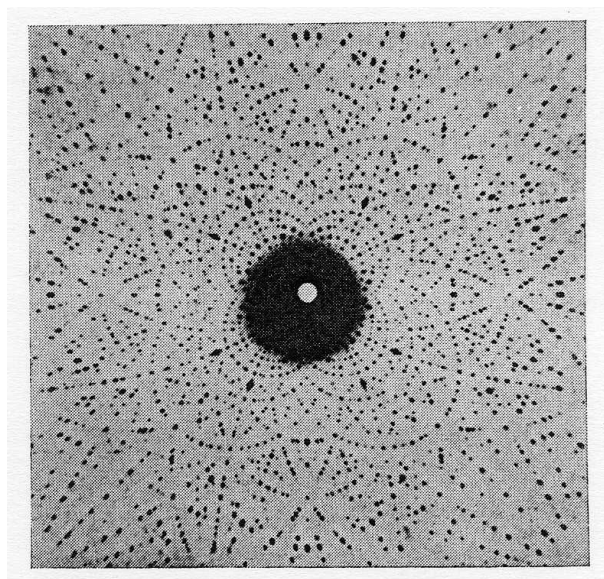


Рисунок 15: Дифракционная картина силикатного комплекса. С сайта [22]

К настоящему моменту рентгеноструктурный анализ это хорошо развитая область науки. Помимо информации о межатомных расстояниях, этот метод очень чувствителен к симметрии кристалла, что позволяет использовать этот метод для установления ориентации кристалла. Например, на рисунке 15 видна 90° симметрия дифракционной картины, что говорит о том что и у кристалла есть ось, поворот вокруг которой на 90° переводит кристалл сам в себя, так называемая ось 4 порядка. В кристаллографии осью n -ого порядка называют ось, поворот вокруг которой на угол $360^\circ/n$ переводит кристалл сам в себя. Существует математическая теорема, которая доказывает, что пространственная периодичность (которая является главным свойством кристалла) разрешает существование только осей симметрии 2, 3, 4 и 6 порядка (соответствующие симметрии к повороту на 180° , 120° , 90° и 60° , соответственно).

Тем удивительнее оказалось открытие, за которое в 2011 году была присуждена Нобелевская премия по химии (Д.Шехтман), что могут существовать квазикристаллы — системы конечного размера, обладающие геометрически совершенной формой с осями симметрии запрещённых для кристаллов порядков. Наблюдение рентгеновской дифракции с осью симметрии 5 порядка, запрещённой для обычных кристаллов (Рисунок 16), стало одним из окончательных доказательств существования таких необычных объектов (Рисунок 17).

X-ray transmission Loue photograph of i-ZnMgHo QC

Curtsey: An-Pang Tsai

Mo radiation 40kV-50mA

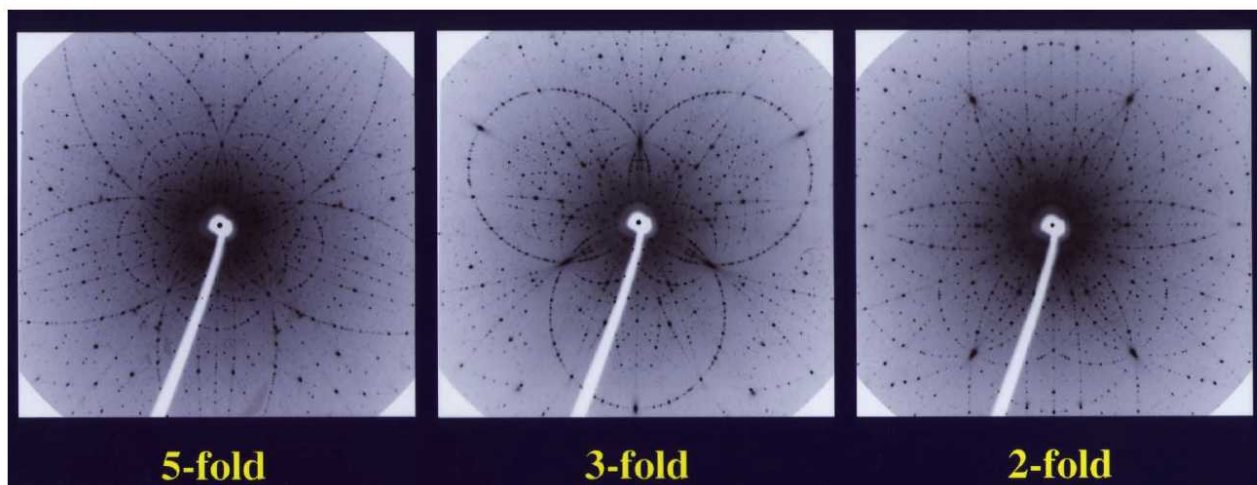


Рисунок 16: Картина рентгеновской дифракции на квазикристалле. На левом слайде имеется ось симметрии 5 порядка, запрещённая в обычных кристаллах. Рисунок из слайдов нобелевской лекции Д.Шехтмана, с сайта [6].

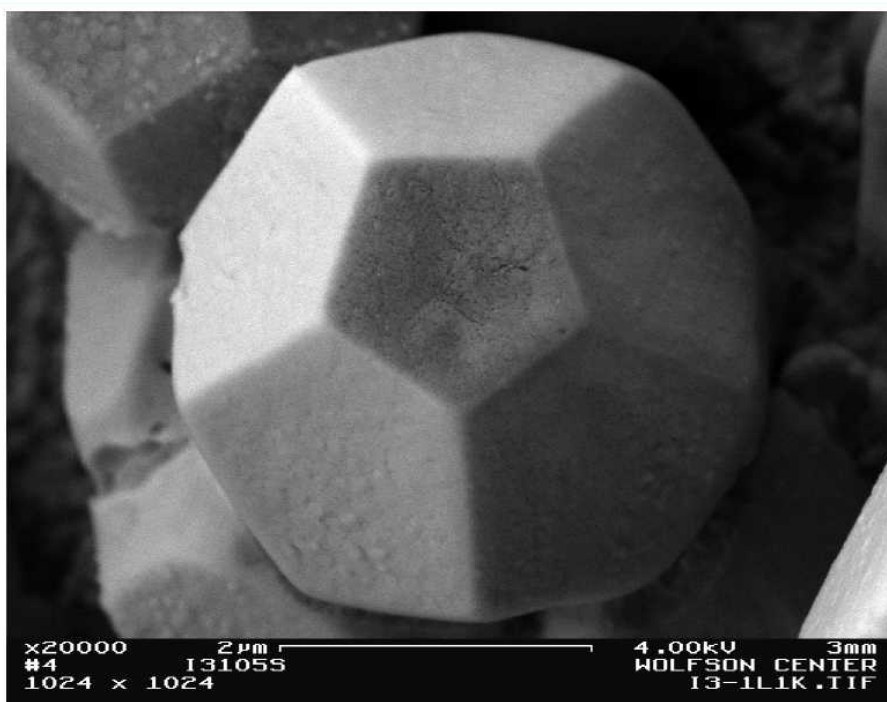


Рисунок 17: Микрофотография квазикристалла сплава Mg-Zn-Ce. Из слайдов нобелевской лекции Д.Шехтмана, С сайта [6].

Так как разные элементы рассеивают рентгеновское излучение с разной эффективностью, по анализу интенсивности дифракционных максимумов можно заключить, от плоскости атомов какого сорта происходило рассеяние и таким образом установить точно расположение атомов внутри элементарной ячейки кристалла.

Этот метод позволил, в частности, установить структуру сложных органических молекул: структуру ДНК [23], пенициллина, инсулина и других. За эти достижения были присуждены Нобелевские премии по физиологии и медицине 1962 года (Крик, Ватсон, Вилкинс) и по химии 1964 года (Ходжкин). Для решения этой задачи выращивается молекулярный кристалл из исследуемых молекул, на котором изучается рентгеновская дифракция. При этом, так как в органических молекулах в основном представлены лёгкие атомы (водород, кислород, углерод, азот) их взаимодействие с рентгеновским излучением слабо. Это приводит к тому, что для накопления данных требуются большие выдержки (например, знаменитая «Фотография 51» полученная Розалинд Франклин (к сожалению, скончавшейся до вручения нобелевской премии) в 1952 году требовала 100 часов экспозиции (рисунок 18). В настоящее время для рентгеновского анализа органических молекул может использоваться синхротронное излучение, благодаря большей интенсивности которого можно получать дифрактограммы за более обозримое время. Расшифровка рентгеновских дифракционных изображений, аналогичных изображениям на рисунках 18 и 19 позволила окончательно установить спиральную структуру ДНК (рисунок 20) - что является ключевым знанием в современной биологии.

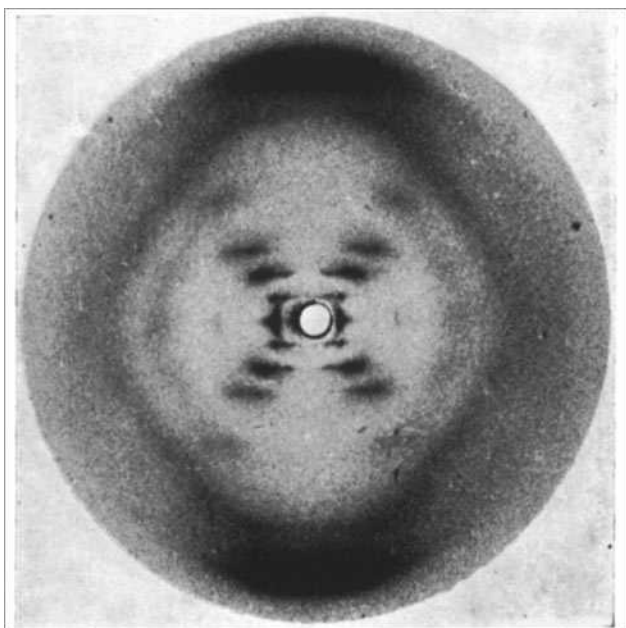


Рисунок 18: "Фотография 51" (Photo 51). Первое изображение рентгеновского рассеяния на ДНК. Получено Розалинд Франклин (1920-1958) в 1952 году. Изображение с сайта [23]

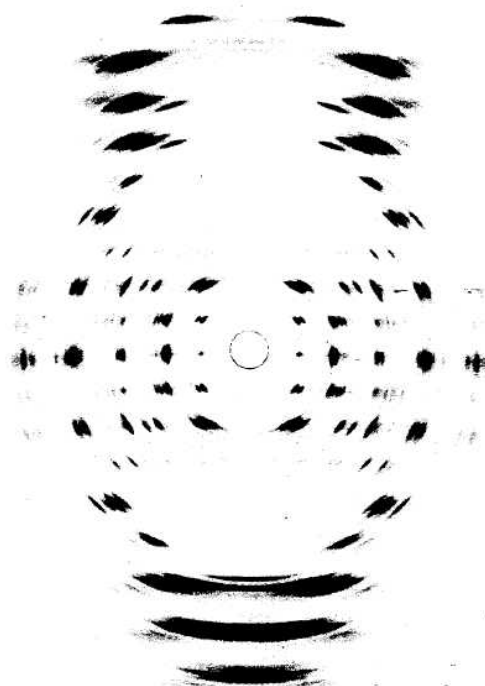


Рисунок 19: Картина рентгеновской дифракции на микрокристалле ДНК. Из нобелевской лекции М.Вилкинса. С сайта [6].

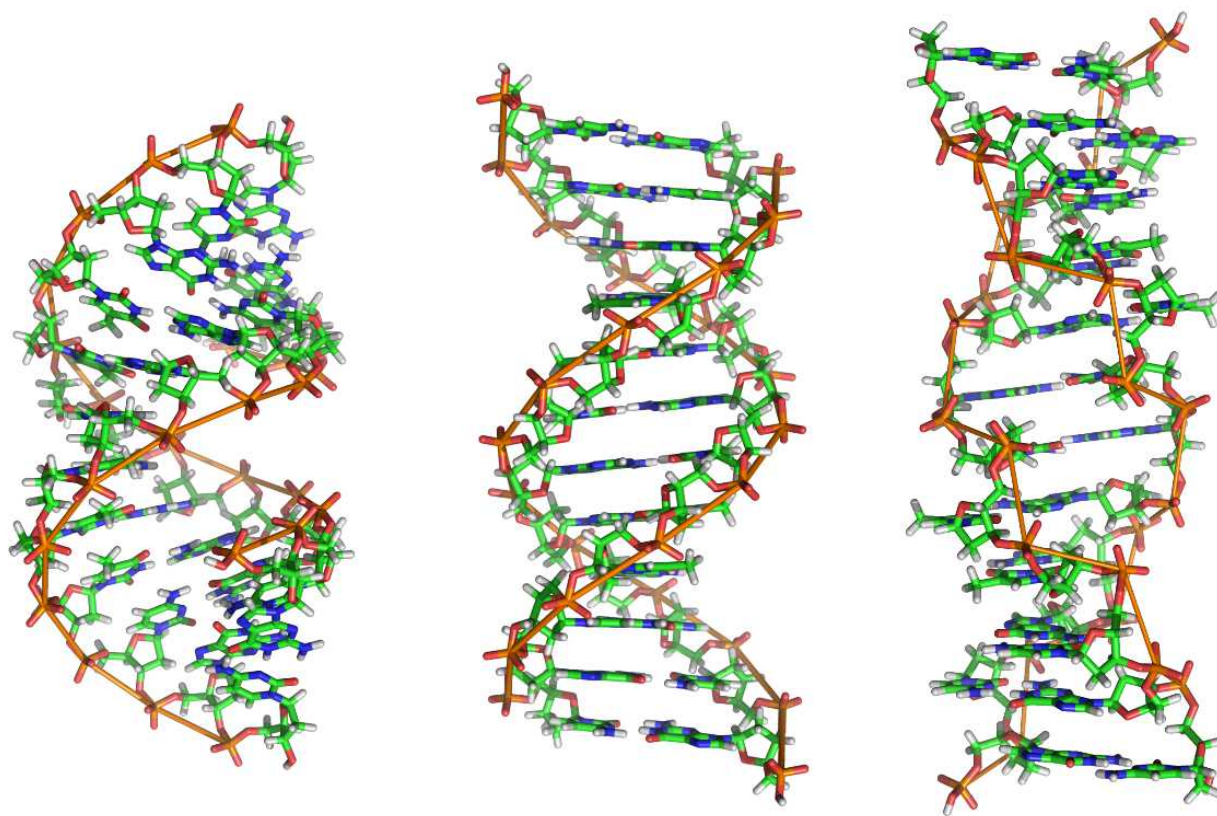


Рисунок 20: Спиральная структура ДНК (слева направо структуры A, B и Z типов). С сайта <http://en.wikipedia.org/wiki/DNA>.

Следующим важным применением рентгеновского излучения является его использование в различных методах неразрушающего контроля, в частности при рентгеновской дефектоскопии и контроле в целях обеспечения безопасности [24], [25], [26]. Это применение связано с большой глубиной проникновения рентгеновских лучей, что позволяет обнаруживать дефекты в толще металла (например в сварных швах, Рисунок 21), либо контролировать содержимое багажа в аэропортах (рисунок 22) или даже «просвечивать» целые контейнеры (рисунок 23). При контроле багажа одновременно используется рентгеновское излучение разных длин волн, по относительному изменению поглощения можно разделить на изображении различные материалы.



Рисунок 21: Рентгентелевизионный комплекс "Артикон М" для контроля сварных швов. С сайта [24].



Рисунок 22: Рентгеновское изображение рюкзака при контроле безопасности. Цветная раскраска - результат компьютерной обработки по сравнению изображений на разных длинах волн. С сайта [25]

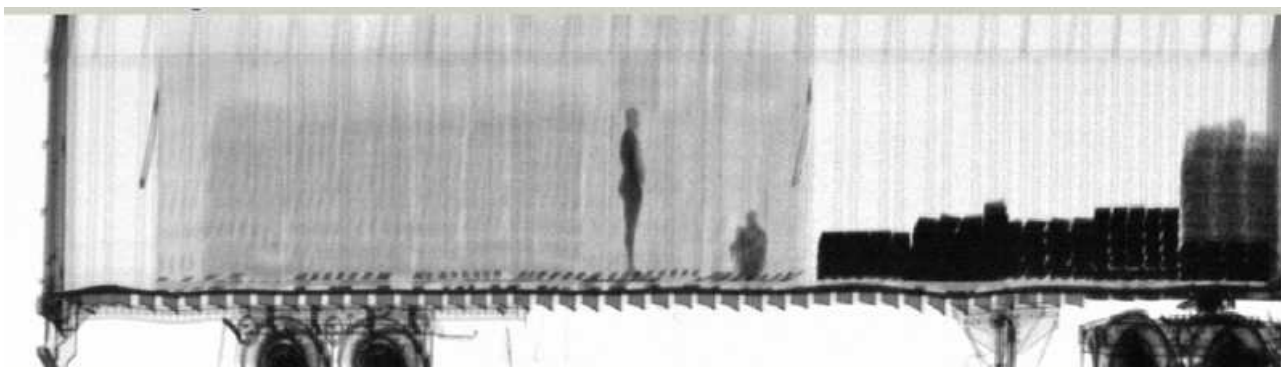


Рисунок 23: Гамма-изображение автомобиля-контейнеровоза, демонстрирующее наличие нелегальных пассажиров. С сайта [26].

В качестве последнего примера применения рентгеновского излучения приведём рентгеновскую литографию. Литография — это технология изготовления миниатюрных элементов электронных схем и различных микроприборов. Типичная последовательность процесса литографии состоит из следующих этапов (которые в сложных схемах могут повторяться до 50 раз):

- нанесение на подложку слоя материала, из которого необходимо сформировать рисунок (например, токопроводящие дорожки);
- нанесение слоя фоторезиста (светочувствительного материала, изменяющего свою растворимость при засвечивании);
- экспонирование (засвечивание) фоторезиста через маску (шаблон);
- вытравливание засвеченного (или, в зависимости от вида фоторезиста, незасвеченного) фоторезиста и вытравливание материала, лишённого защиты фоторезиста;
- удаление оставшегося фоторезиста.

Прогресс электронной техники был в последнее время связан с миниатюризацией [27] —

возможностью размещать всё большее количество элементов на той же площади микросхемы. Однако помимо технических деталей, этот процесс ограничивается и физическими законами — на этапе экспонирования невозможно обойти дифракционные ограничения. То есть, точность литографического изображения ограничивается примерно длиной волны используемого при литографии излучения. Поэтому прогресс развития литографии двигался в сторону уменьшения длины волны используемого излучения в область ультрафиолета и далее в область рентгеновского излучения (рисунок 24).

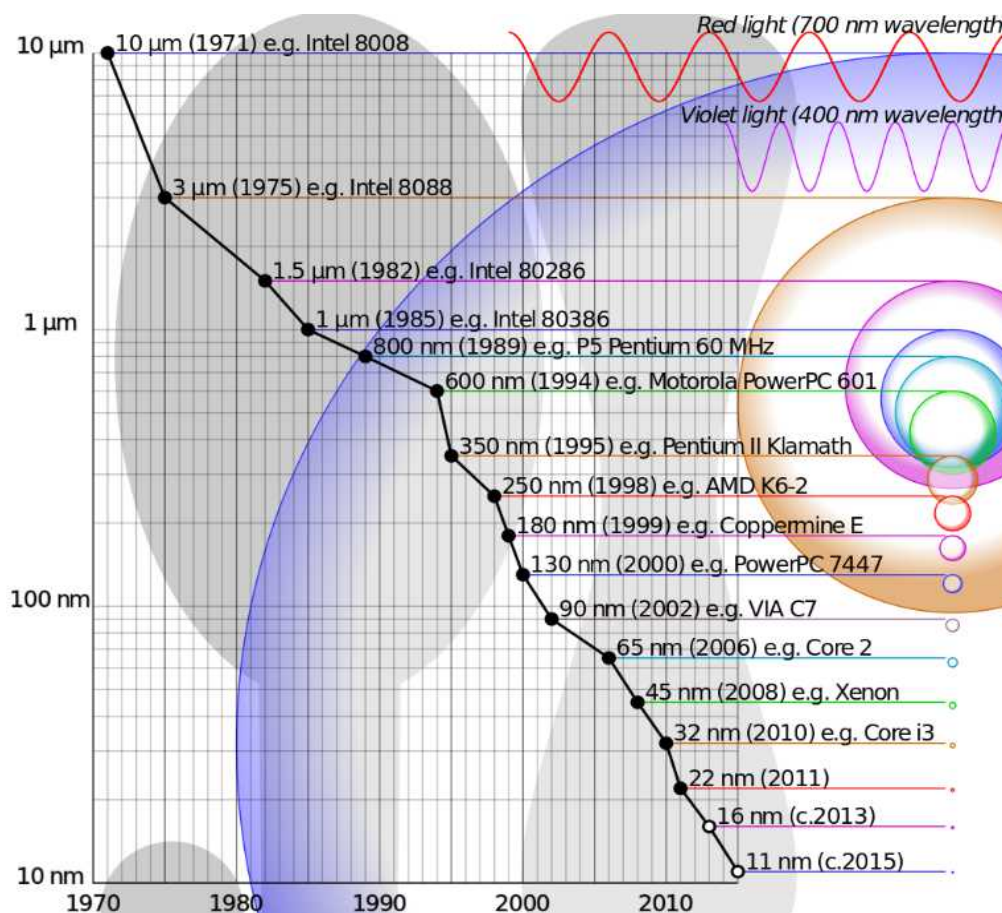


Рисунок 24: Прогресс миниатюризации в микроэлектронике. С сайта [27].

Рентгеновская литография [28] использует излучение с длиной волны менее нанометра и является одним из способов получать элементы размером в нанометры — десятки нанометров, а также микроструктуры большой глубины с высокой точностью. В качестве источника мощного рентгеновского излучения при этом также может выступать синхротронное излучение. Примеры полученных структур представлены ниже на рисунках 25, 26, 27.

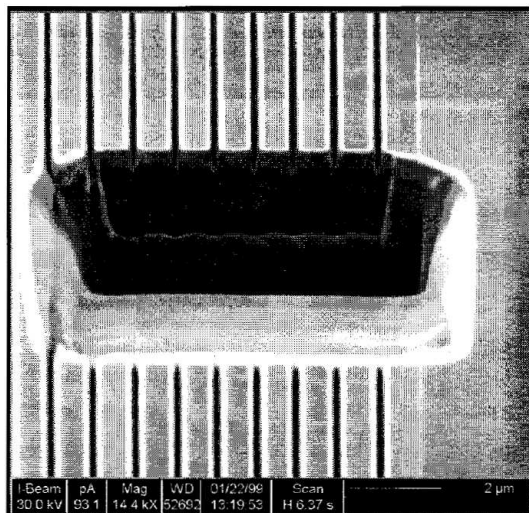


Рисунок 25: Получение разрезов шириной ~20нм и длиной 400 мкм в 3.5 мкм слое золота при помощи рентгеновской литографии. Из [28].

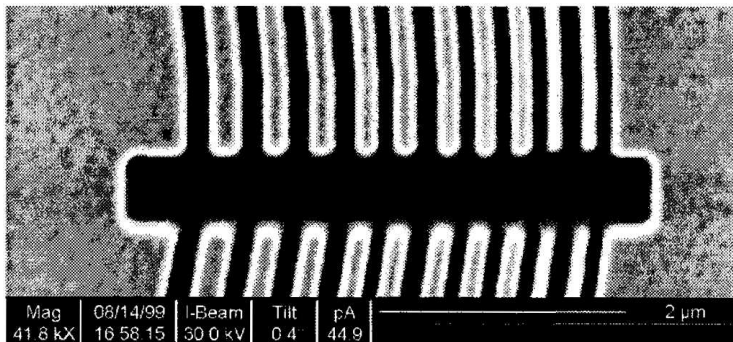


Рисунок 26: Изготовленная методом рентгеновской литографии зонная пластинка. Из [28].

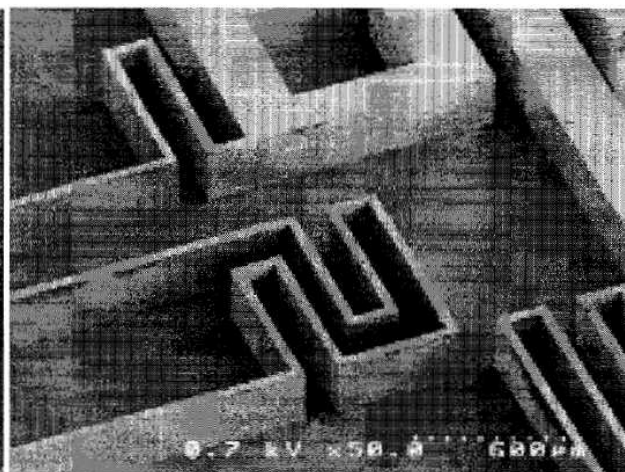
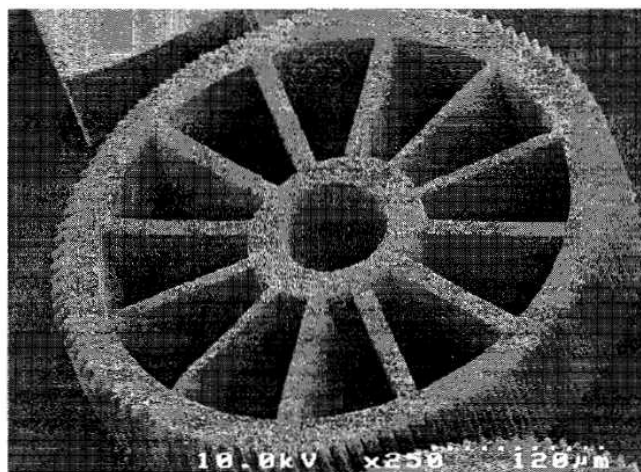


Рисунок 27: Полученные при помощи рентгеновской литографии структурные элементы с микронной детализацией. Из [28]

Взаимодействие атомов. Химическая связь.

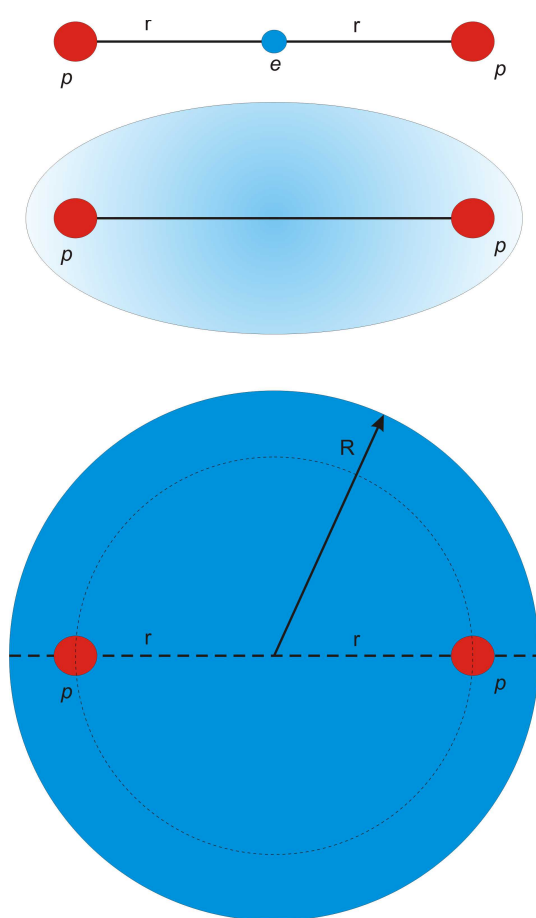


Рисунок 28: Схематическое изображение молекулярного иона водорода. Верхний рисунок - классическое приближение, средний - распределенным зарядом, нижний - модельный случай равномерно распределенного по сфере отрицательного заряда.

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с взаимодействием атомов и формированием молекул. Этими вопросами сейчас занимается квантовая химия. Точное решение квантовомеханической задачи многих тел как правило возможно только численно, современные компьютеры позволяют решать эту задачу для довольно сложных молекул. Задача облегчается тем, что в образовании химической связи участвуют внешние, наименее связанные с ядром электроны. Это, кстати, сразу даёт нам оценку масштаба энергии при формировании химической связи. Как мы видели, энергии ионизации различных атомов варьируются около 1эВ. При перераспределении внешних электронов естественно ожидать, что возможный выигрыш в энергии будет иметь тот же масштаб. Отсюда следует, что химические связи должны разрушаться (что соответствует диссоциации молекул) при температурах в 1000-10000К, что

Какие причины соединяют два атома вместе? В качестве самого простого примера рассмотрим молекулярный ион водорода H_2^+ . Это однажды ионизованная молекула водорода,

широко распространённая в газовых облаках в космосе. В этой системе есть три заряженных частицы: два положительно заряженных протона и отрицательно заряженный электрон.

Рассмотрим эту задачу классически (рисунок 28-сверху) с точки зрения законов электростатики: два протона и электрон между ними. Правый протон притягивается к электрону с силой $k \frac{e^2}{r^2}$ и отталкивается от левого протона с силой $k \frac{e^2}{4r^2}$. То есть,

притяжение оказывается сильнее, и в этой модели протоны должны притянуться в точку нахождения электрона. Это находится в соответствии с известной теоремой электростатики о невозможности статического равновесия в классической электростатике. Однако это простое рассуждение полезно тем, что показывает, что в системе в которой положительных зарядов больше всё-равно могут доминировать силы притяжения.

Квантовомеханическое решение этой задачи также предсказывает возникновение притяжения, однако по мере сближения становится необходимо учитывать делокализацию электрона (из-за его меньшей массы протоны при этом можно продолжать считать

точечными). Качественно, это соответствует тому, что электрон иногда оказывается не «между протонами», а «левее левого» или «правее правого», что ослабляет эффект притяжения (рисунок 28-посередине).

Для качественного анализа можно рассмотреть искусственную модель «пудинга Томпсона наоборот»: два точечных положительных заряда внутри равномерно отрицательно заряженного шара (рисунок 28-снизу). Как мы помним из электростатики (теорема Гаусса) внешние сферические слои не создают электрическое поле. Соответственно, сила действующая на протон в направлении центра сферы

$$k \left(\frac{r}{R} \right)^3 \frac{e^2}{r^2} - k \frac{e^2}{4r^2} = k \frac{e^2}{R^2} \left(\frac{r}{R} - \frac{1}{4} \frac{1}{(r/R)^2} \right).$$

Сила обращается в ноль при $r = R/2$ и сменяется с притяжения на больших расстояниях на отталкивание при близких. Таким образом эта модель пудинга качественно воспроизводит известную нам картину вандерваальсовского взаимодействия атомов: из-за перераспределения электронов в область между атомами возникает эффективная сила притяжения электростатической природы, сменяемая на близких расстояниях силой отталкивания.

Добавляя к рассмотренному молекулярному иону второй электрон, мы получим нейтральную молекулу. При этом некоторые правила заполнения электронных уровней в молекуле определяются общими законами квантовой механики и могут быть по аналогии распространены из обсуждавшейся нами схемы заполнения уровней в атоме. Дискретные молекулярные уровни энергии приводят также к возникновению характерных спектров излучения. Также в силе остаётся запрет Паули — два электрона не могут находиться в одном состоянии. Поэтому на низкоэнергетичное состояние молекулы водорода можно поместить всего два электрона, отличающихся проекцией собственного момента вращения (спина).

С действием принципа Паули связана интересная возможность получения и сохранения атомарного водорода при комнатной температуре и даже при температурах близких к абсолютному нулю. При нормальных условиях два атома водорода соединяются в молекулу с выделением энергии 4.8эВ. Молекулу можно расщепить, если нагреть газ до температур в тысячи градусов либо в электрическом разряде — но при снижении температуры атомы вновь начнут соединяться в молекулы, являющиеся энергетически более выгодным состоянием. Однако, если поместить газ в сильное магнитное поле, атомы водорода намагнитятся — их намагниченность, в основном связанная со спином электрона, будет направлена вдоль поля. Соответственно, спины электронов всех атомов окажутся сонаправлены и запрет Паули окажется препятствием для объединения таких атомов в молекулу. Такая схема сохранения атомарного водорода реально используется в современных лабораториях, например в финском университете города Турку [29].

Атомный силовой микроскоп.

Интересным и наглядным проявлением взаимодействия атомов является работа атомного силового микроскопа [30]. Этот прибор работает подобно сканирующему туннельному микроскопу (за изобретение которого была присуждена 1/2 Нобелевской премии по физике 1986 года Г.Биннингу и Г.Рореру). Однако вместо туннельного тока измеряется сила взаимодействия атомов на острие сканирующей иглы с атомами исследуемой поверхности. Для измерения этой силы игла устанавливается на конце гибкой консоли. В первых экспериментальных приборах это был микроосколок алмаза установленный на золотой фольге. В современных версиях (выпускаемых коммерчески) консоль с иглой обычно формируется литографическими методами из кремния или его соединений (рисунки 29, 30).

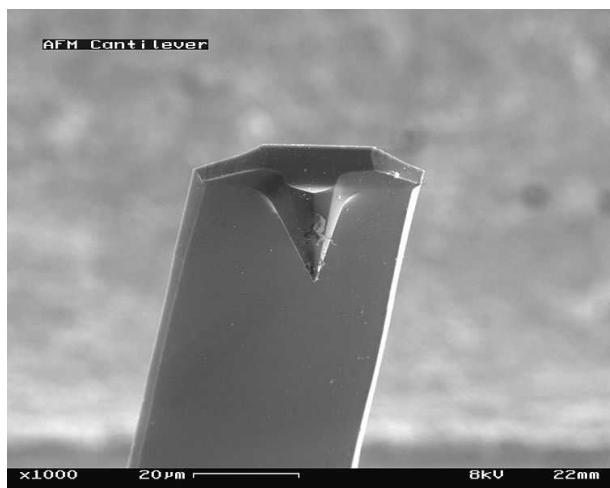


Рисунок 29: Изображение иглы атомного силового микроскопа. С сайта [30].

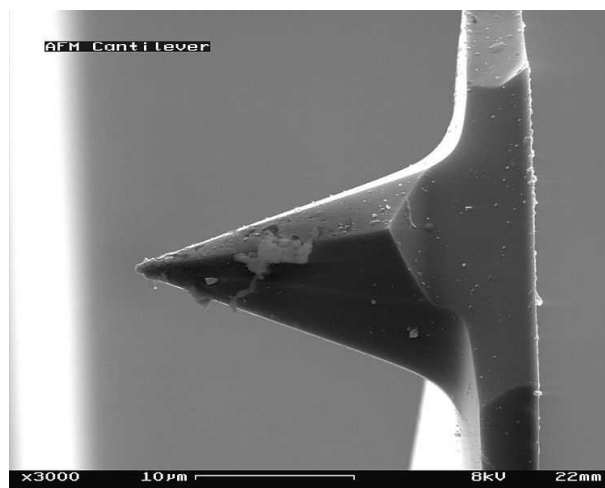


Рисунок 30: Изображение иглы атомного силового микроскопа. С сайта [30].

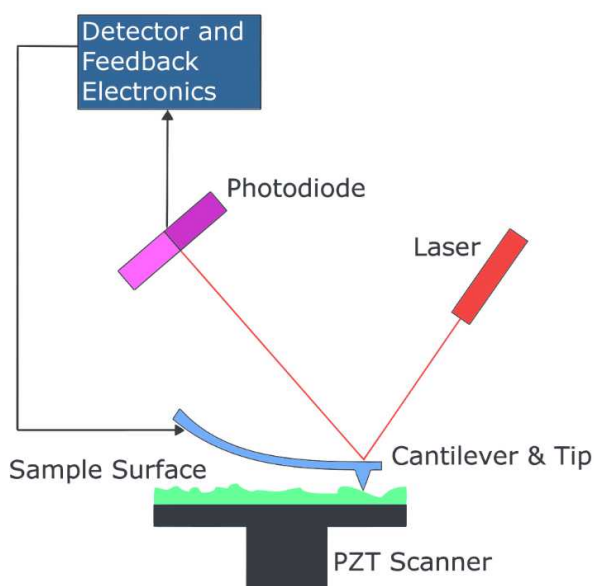


Рисунок 31: Схема работы атомного силового микроскопа. С сайта [30].

Конец иглы подводится к поверхности исследуемого образца так близко, что он начинает чувствовать межатомные вандерваальсовы силы (расстояние до поверхности порядка 1-10 нм). Можно сказать, что острие иглы практически находится в контакте с поверхностью. Возникающая под действием сил взаимодействия иглы и поверхности деформация консоли детектируется, например, при помощи отклонения направленного на консоль луча лазера (рисунок 31).

Передвигая иглу вдоль образца (как и в туннельном микроскопе, обычно это делается при помощи пьезоэлементов) и поддерживая постоянным расстояние между иглой и поверхностью (поддерживая постоянную деформацию консоли), можно получить карту поверхности («поверхность постоянной силы») с разрешением порядка нанометра или даже лучше.

В отличие от туннельного микроскопа, силовой микроскоп не требует, чтобы образец был проводящим. Это позволяет исследовать в том числе и диэлектрические (и даже органические) соединения. Если на иглу поместить молекулы одного сорта, а на поверхность — молекулы другого сорта, то можно с большой чувствительностью измерить взаимодействие этих молекул, что имеет принципиальное значение для задач физики длинных молекул: полимеров, ДНК.

Ниже представлен набор изображений разных систем, полученных атомным силовым микроскопом [31][32][33][34]. Цвет на этих рисунках подобран компьютером, его интенсивность или изменение соответствуют изменению уровня поверхности.

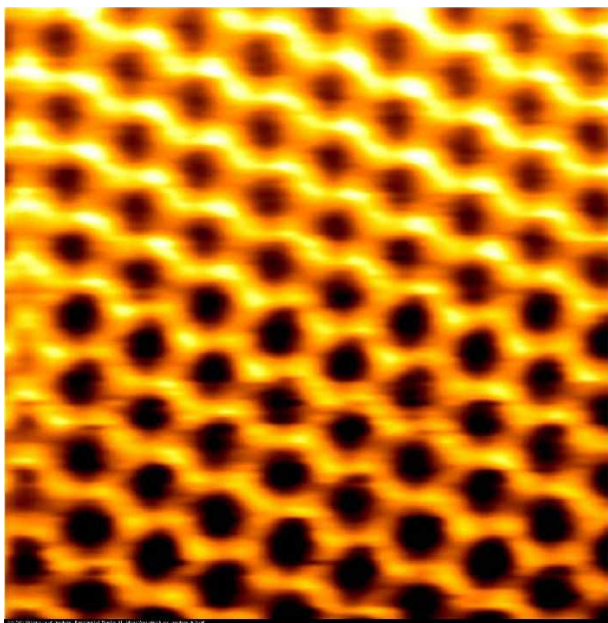
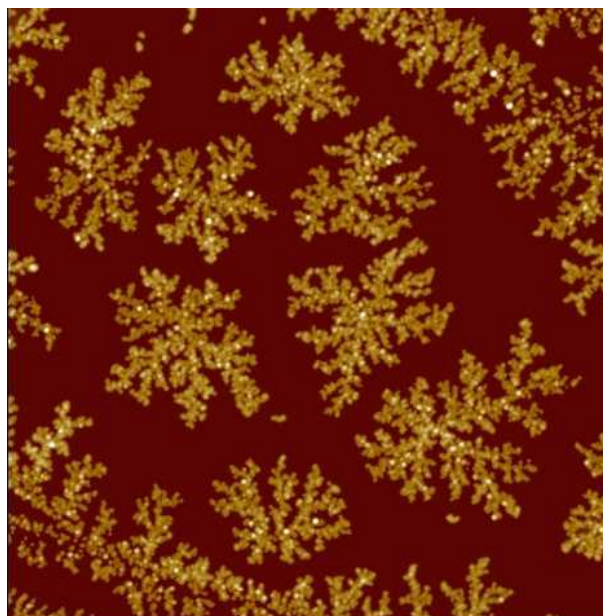


Рисунок 32: Изображение поверхности графита, полученное при помощи атомного силового микроскопа. Размер кадра $2 \times 2 \text{ нм}^2$. С сайта [31].



©CNRS - DPM/IRC - Cadete Santos Aires

Рисунок 33: Образования из сурьмы на поверхности графита, полученные испарением сурьмы с последующим осаждением. С сайта [32].



Рисунок 35: Изображение молекулы ДНК, полученное атомным силовым микроскопом. Размер области сканирования 530 нм. С сайта [33].

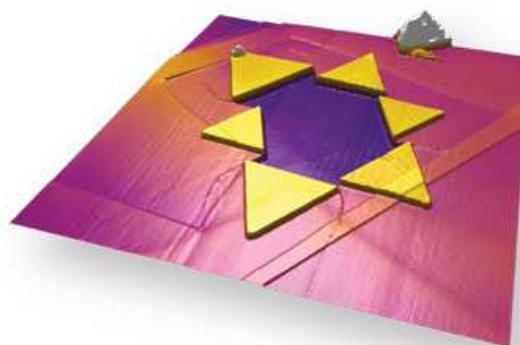


Рисунок 34: Дефект на поверхности графита. Размер области сканирования 1.7 мкм. С сайта [33].

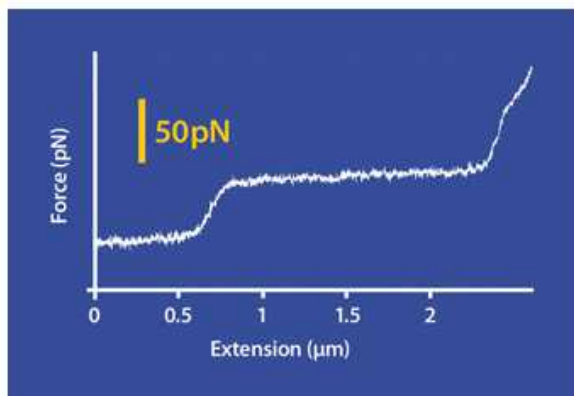


Рисунок 36: Зависимость силы межмолекулярного взаимодействия от расстояния для молекулы ДНК. С сайта [33].

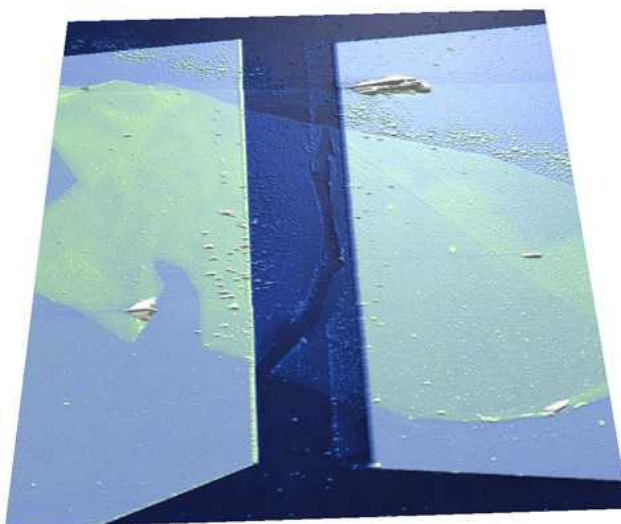


Рисунок 37: Пластика графена (на рисунке - светлоголубая область, лежит по диагонали кадра) на литографически подготовленных контактах (прямоугольные области). Размер области сканирования 12.5 мкм. Изображение получено Андрасом Кисом (EPFL). С сайта [34].

Лекция 2. Строение ядра.

Элементы квантовой электродинамики: виртуальные частицы и их экспериментальные подтверждения (сдвиг Лэмба, аномальный магнитный момент электрона, динамический эффект Казимира).

Прежде чем перейти к изучению атомного ядра, давайте рассмотрим вкратце вопрос о том как устроено электромагнитное поле и физический вакуум с точки зрения квантовой теории (квантовой электродинамики). Некоторые возникающие при этом концепции окажутся существенными при рассмотрении ядерных сил и элементарных частиц, а в области атомной физики есть несколько ярких экспериментальных фактов, подтверждающих правильность этих воззрений.

Во-первых, вспомним, что в квантовой теории есть несколько соотношений неопределённости. Собственно, соотношения неопределённости в квантовой физике возникают всегда, когда речь идёт о сравнении точности измерения нескольких величин, которые принципиально не измеримы одновременно. Наиболее известно соотношение неопределённости Гейзенберга для координаты и импульса $\Delta p_x \cdot \Delta x \sim \hbar$. Есть ещё соотношение неопределённости для энергии $\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$, где ΔE - точность измерения энергии, а Δt - время проведения измерения. Качественно это соотношение может быть обосновано тем, что для проведения абсолютно точного измерения надо обеспечить полную передачу энергии от исследуемого объекта к измеряющему прибору, что требует бесконечно большого времени, а при очень быстром измерении большую точность обеспечить невозможно.

С другой стороны, это означает, что при наблюдении за системой в течение короткого времени τ мы принципиально не в состоянии определить энергию этой системы точнее, чем $\Delta E \simeq \frac{\hbar}{\tau}$. Вспоминая связь между массой и энергией из теории относительности, это означает, что мы не можем точно определить массу и количество частиц в системе за время наблюдения. Из этого следует неожиданная с точки зрения классической физики возможность — кратковременного возникновения частиц (точнее, пар частиц, чтобы обеспечить другие законы сохранения) в вакууме. Оценим о каком масштабе времени идёт речь: для самых лёгких частиц электрона и позитрона минимальная энергия определяется их массой покоя и $\Delta t \sim \frac{\hbar}{2mc^2} \sim 6 \cdot 10^{-22} \text{ сек}$. Для более тяжёлых частиц это время ещё меньше.

Таким образом, квантовая теория приводит нас к отходу от понятия вакуума, как «абсолютной пустоты», и приводит к представлению о вакууме, как о своеобразном «кипящем супе» постоянно рождающихся и уничтожающихся пар элементарных частиц. Эти частицы называют виртуальными.

Виртуальные частицы некоторых типов рассматриваются как переносчики взаимодействий между частицами: частица «А» может испустить такую виртуальную частицу «В» которая потом будет поглощена частицей «С». В итоге с точки зрения внешнего наблюдателя произошёл акт взаимодействия частиц «А» и «С», а частица «В» существовала только в момент взаимодействия (и могла бы рассматриваться как математический метод описания взаимодействия, если бы не некоторые экспериментальные факты, подтверждающие их существование). Простой моделью такого взаимодействия через частицу-переносчик является взаимодействие двух человек на коньках, перебрасывающих мячик — между ними возникает отталкивание (для полной аналогии надо добавить чтобы мячик возникал в момент броска и пропадал, когда пойман, что уже не вообразимо в классическом мире). Из этой

модели следует сразу связь между массой частицы-переносчика взаимодействия m и расстояния на котором осуществляется взаимодействие r . Так как максимальная скорость частицы равна скорости света, то $r \sim c \Delta t \sim \frac{c \hbar}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc}$. То есть, всякое взаимодействие через посредство массивных частиц окажется короткодействующим, например для массы электрона (самой лёгкой частицы) для оценки получаем $r \sim 4 \cdot 10^{-13} \text{ м} = 0.004 \text{ \AA}$. Для дальнодействующего электромагнитного взаимодействия частицей-переносчиком являются виртуальные фотоны с нулевой массой покоя. К сожалению, подробное обсуждение этой модели требует уже строгого изложения теории, что выходит за рамки курса. За разработку этого подхода была присуждена Нобелевская премия по физике 1965 года (Томонага, Швингер, Фейнман).

Сдвиг Лэмба.

Одно из доказательств существования виртуальных частиц — это так называемый сдвиг Лэмба [35]. Этот эффект был экспериментально обнаружен при изучении «краеугольного камня» квантовой механики — атома водорода.

Как мы знаем, теория Бора (как и более строгое решение задачи об атоме водорода в нерелятивистской квантовой механике) предсказывает, что в атоме водорода уровни энергии определяются только главным квантовым числом. В частности, энергии 2s и 2p уровней в этой модели совпадают. Релятивистская теория Дирака предсказала, что из шести 2p состояний четыре должны иметь чуть большую энергию, чем два оставшихся, а эти два оставшихся 2p-состояния должны совпадать по энергии с 2s-состояниями. Это разделение 6 состояний на «4+2» связано со сложением орбитального и спинового моментов вращения электронов: p-состоянию соответствует орбитальный момент $l=1$ (в единицах $\hbar$), а собственный момент электрона $s=1/2$. Их сложение может дать полный момент 1/2 (антипараллельная ориентация) либо 3/2 (параллельная). По общим правилам квантовой механики проекция момента вращения может меняться на 1, так что состояний первого типа всего 2, а состояний второго типа 4. Величина предсказанного расщепления составляет около 50 мкэВ (энергия основного состояния в атоме водорода -13.6 эВ, а энергия состояния с $n=2$ равна -3.4эВ).

Это отличие, называемое тонкой структурой, приводило к небольшой разнице частот переходов из состояния 2p в состояние 1s из разных групп 2p состояний и наблюдалось в спектроскопических экспериментах как небольшое раздвоение соответствующих линий спектра. Ещё более точные эксперименты Лэмба (за которые ему была присуждена 1/2 нобелевской премии 1955 года) показали, что предсказываемого теорией Дирака совпадения энергии 2p состояния с антипараллельной ориентацией спина электрона и орбитального момента и 2s состояния не происходит: 2s состояния атома водорода оказываются чуть выше по энергии. Это расщепление составляет около 1 ГГц в частотных единицах или 4 мкэВ, но оно надёжно наблюдается методом ядерного магнитного резонанса.

Этот эффект объясняется испусканием и поглощением атомом виртуальных фотонов. В результате этого на электрон действует не только центрально-симметричное кулоновское поле ядра (в котором имело бы место предсказанное Дираком вырождение), но и случайное флуктуирующее электрическое поле виртуальных фотонов, изменяющееся с расстоянием и поэтому по разному воздействующее на состояния 2s и 2p с разным пространственным распределением волновой функции электрона. Вычисление предсказывает расщепление в согласии с экспериментом.

Аномальный магнитный момент электрона.

При орбитальном движении заряженной частицы возникает магнитный момент, который можно объяснить током, протекающим по «витку» совпадающему с орбитой движения частицы. Частице с орбитальным моментом вращения равным 1 (в единицах $\hbar$) соответствует магнитный момент равный магнетону Бора $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 927 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}$ (в системе СИ). С собственным спиновым моментом вращения также оказывается связан магнитный момент, не имеющий классической аналогии.

Релятивистская теория Дирака предсказывает, что связанный со спиновым моментом вращения магнитный момент ровно вдвое больше, чем вклад от такого же орбитального момента. То есть, для электрона ($s=1/2$) спиновый магнитный момент равен μ_B . Однако точные измерения, впервые с достаточной точностью произведённые Кушем (за что была присуждена 1/2 нобелевской премии 1955 года), показали, что на самом деле он примерно на 0.1% больше предсказанного значения (отличие, измеренное Кушем составило 0.119% магнетона Бора) [36]. Это отличие, называемое аномальным магнитным моментом электрона, является одной из самых точно измеряемых величин в физике, достижение 2010 года составляет 1.001 159 652 180 73 (28).

Для объяснения этого отличия также используется учёт взаимодействия электрона с виртуальными фотонами, дающий основной вклад, а также более тонкие эффекты связанные с присутствием виртуальных электрон-позитронных пар. Теоретический расчёт даёт ответ согласующийся с экспериментом. Аналогичный эффект наблюдается и с более тяжёлым «родственником» электрона — мюоном [37].

Эффект Казимира.

Необычное проявление существования виртуальных частиц связано с так называемым эффектом Казимира [38]: предсказанием голландским физиком Хендриком Казимиром возникновения силы притяжения между двумя параллельными двусторонними зеркальными пластинами при малом расстоянии между пластинами. Эффект связан с тем, что два параллельных зеркала образуют оптический резонатор — между ними могут существовать только стоячие электромагнитные волны с длиной волны, удовлетворяющей условию резонанса $d = n\lambda/2$, где d - расстояние между пластинами.

Таким образом, в узком зазоре окажется подавлена часть виртуальных фотонов с нерезонансными длинами волн, в то время как во внешнем пространстве они сохранятся невозмущёнными. Так как при отражении электромагнитные волны оказывают давление на зеркало, окажутся нескомпенсированными давления из зазора и из внешнего пространства и возникнет сила притяжения между пластинами.

Величина этой силы на единицу площади, вычисленная Казимиром для плоских зеркал $F = -\left(\frac{\pi^2}{240}\right) \frac{\hbar c}{d^4}$. Для двух пластин площадью 1 см^2 на расстоянии 1 мкм эта сила составляет порядка 10^{-8} Н . Этот эффект также проявляется и при решении задач взаимодействия атомов и молекул.

Кроме того, были проведены и наглядные эксперименты с макроскопическими пластинами размером 19 мм на 1.2 мм , сближаемыми на расстояние $0.5\text{--}3.0 \text{ мкм}$ [39], подтвердившие возникновение такой силы с точностью около 15% по сравнению с предсказанием теории.

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) [40][41]. 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 38, 39 ниже.

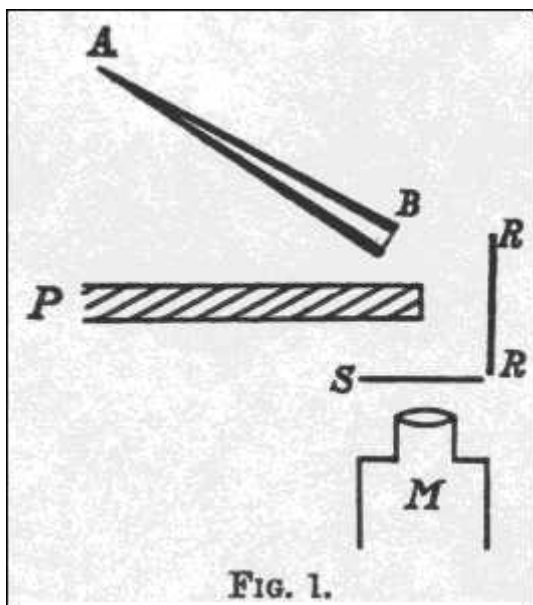


Рисунок 38: Опыт Гейгера-Марсдена (по статье [40]). АВ - трубка с источником альфа-частиц, Р - свинцовый экран, RR - отражающая фольга, S - сцинтиляционный экран, М - микроскоп.

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

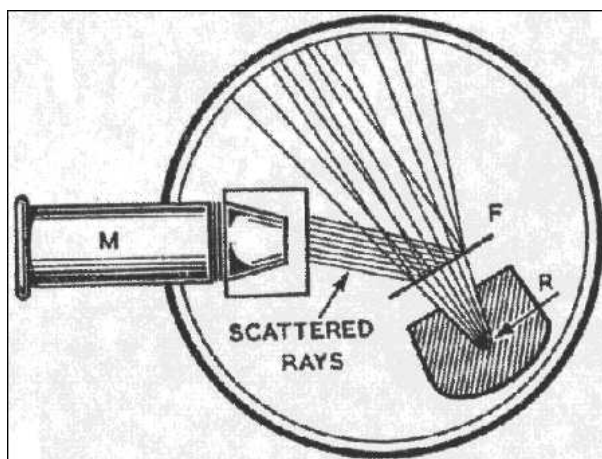


Рисунок 39: Разновидность опыта Резерфорда (с сайта [41]) R - источник радиации, F - фольга, М - микроскоп с сцинтиллирующим экраном.

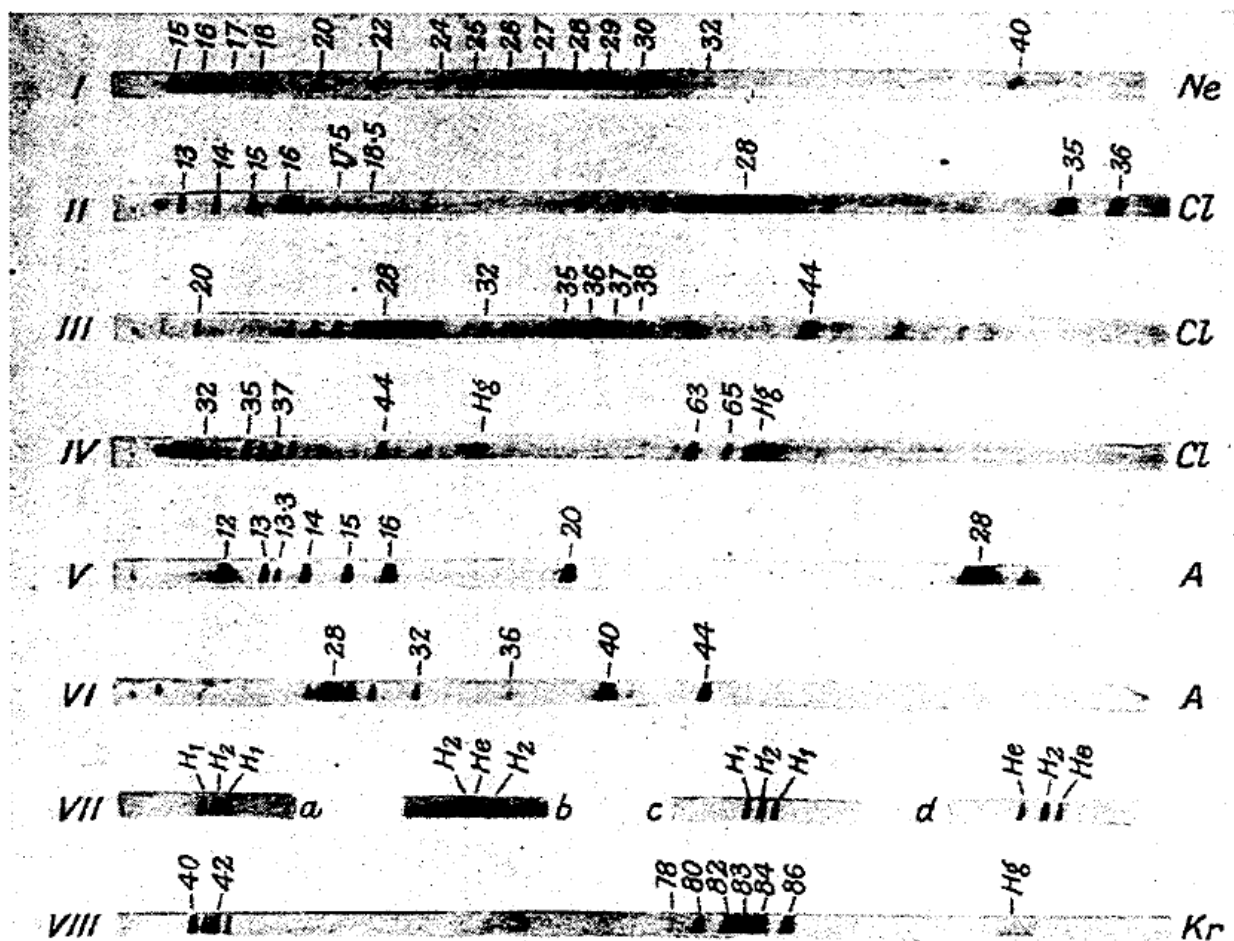


Рисунок 40 Масс-спектры некоторых элементов. Из нобелевской лекции Ф.Астона [6].

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 40). 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 41).

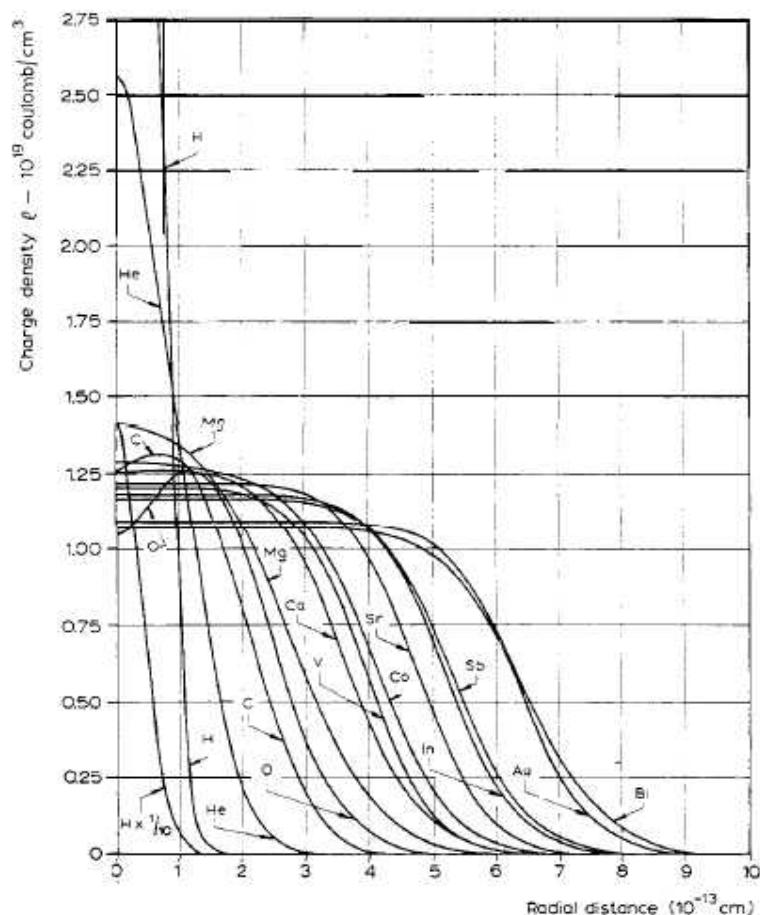


Рисунок 41: Распределение плотности заряда в ядрах разных элементов по результатам рассеяния высокоэнергетических (~ 100 МэВ) электронов. Из нобелевской лекции Р.Хофштадтера [6].

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 [6]): *«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.

Однако эта модель была несовершенна — не было понятно, какие силы могут удерживать электрон и протон настолько близко (ведь учёт кулоновского взаимодействия протона и электрона приводит к атомному масштабу длины). Кроме того, экспериментально было установлено, что ядро азота ${}_7N^{14}$ является бозе-частицей (обладает целым спином), в то время как электрон-протонная модель ядра предполагала, что в ядре азота 14 протонов и 7 электронов — то есть нечётное количество частиц со спином 1/2, которые в сумме могут дать только полуцелый спин. В 1930 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 [43].

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.

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 [44], 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 отображено следующими диаграммами:

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.

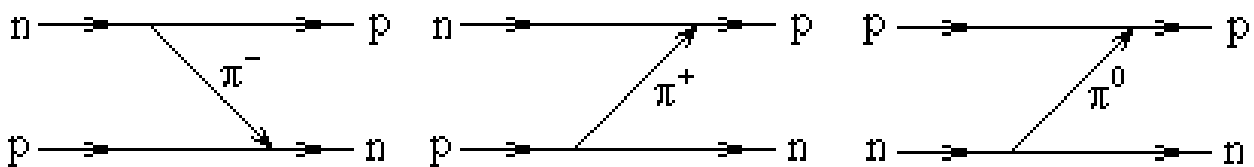


Рисунок 42: Диаграммы взаимодействия протона и нейтрона через различные мезоны. Два протона или два нейтрона взаимодействуют по третьему каналу, с помощью нейтрального π^0 -мезона. С сайта [44].

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 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 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 [6]).

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

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

$$E_{\text{св}} = (Z m_p + N m_n - M_{\text{ядра}}) c^2, \text{ где } Z \text{ и } N \text{ — числа протонов и нейтронов в ядре, а}$$

$$M_{\text{ядра}} \text{ — полная масса ядра.}$$

Оказывается удобным ввести удельную характеристику — энергию связи 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. Зависимость удельной энергии связи на нуклон от ядра является очень важной для описания свойств ядер [45], она показана на рисунке 43.

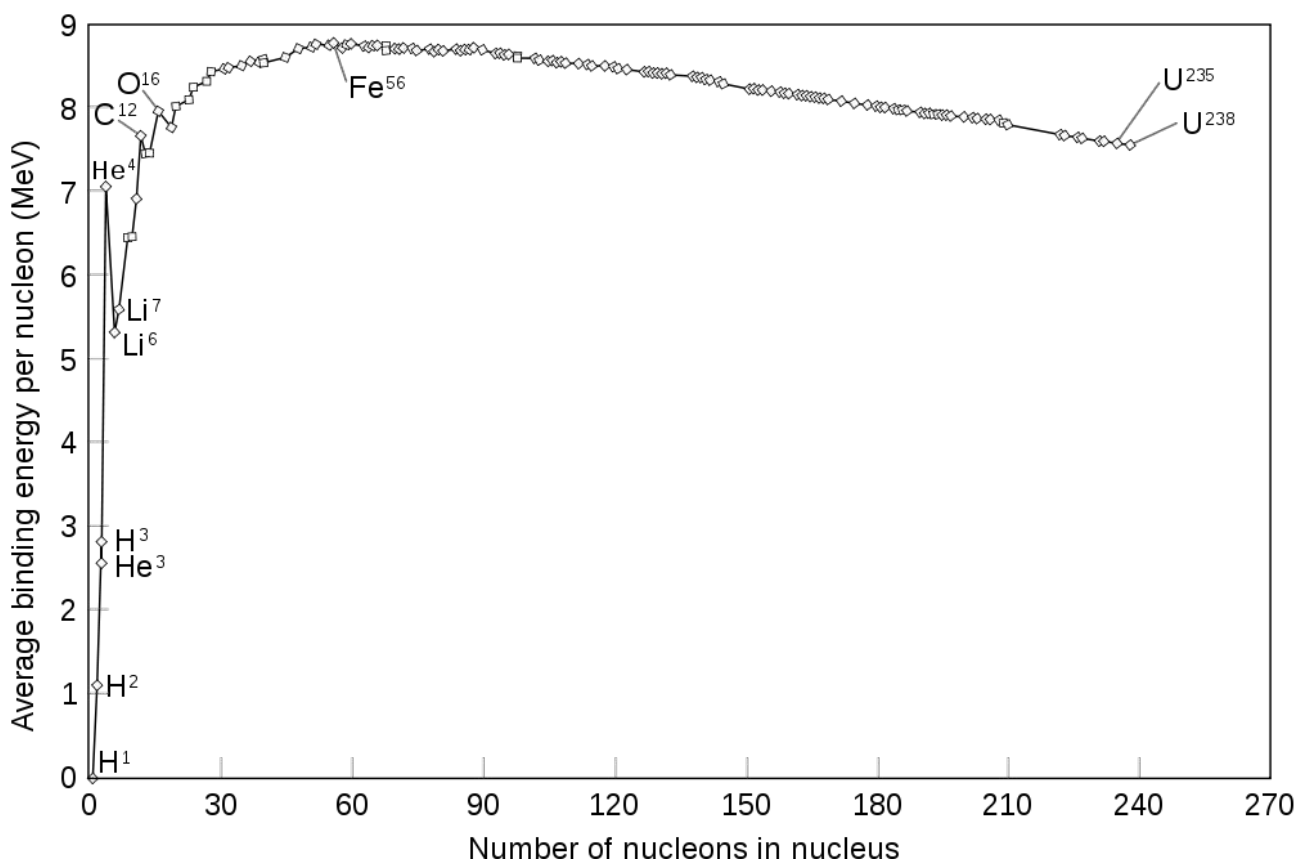


Рисунок 43: Зависимость удельной энергии связи ядра от массы ядра. С сайта [45].

У графика на рисунке 43 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. Эти максимумы объясняются в оболочечной модели ядра, про которую мы поговорим позже, и соответствуют некоторым выделенным количествам протонов или нейтронов в ядре.

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 ($1 \text{ а.е.м.} = 1/12$ массы изотопа углерода $^{12}\text{C} = 1.6528 \times 10^{-27} \text{ кг} = 931.44 \text{ МэВ}$) и 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 $\Delta m = E_{\text{св}}/c^2 = Z m_p + N m_n - M$. В этом определении дефект массы всегда положителен.

Строение атомного ядра. Изотопы, изобары и изомеры.

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 называли изотопами (от греческого «изо»-одинаковый и «топос» - место, то есть, «занимающий одно место в таблице Менделеева») [46]. 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'».

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.

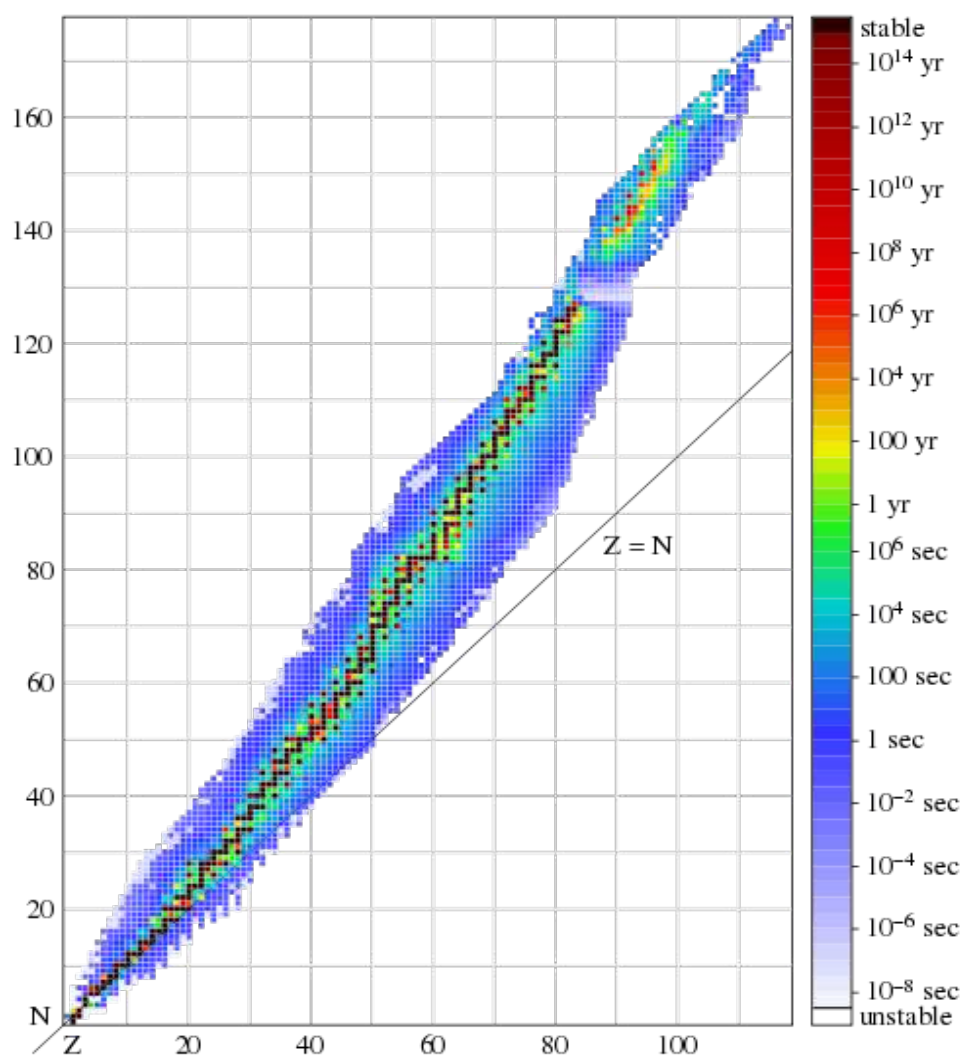


Рисунок 44: Диаграмма времени жизни изотопов с разным числом протонов и нейтронов. Время жизни показано цветом согласно шкале слева. С сайта [46].

Статистика по изотопам (рисунок 44) 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.

Кроме этого, анализ данных по стабильности изотопов показывает на некоторую «особенность» ядер с определёнными (так называемыми «магическими»¹⁾) числами протонов или нейтронов: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Например, обнаружилось, что цирконий (50 нейтронов), олово (50 протонов), барий (82 нейтрона), свинец (82 протона и 126 нейтронов) встречаются в природе чаще, чем их соседи по периодической таблице. Четыре известных радиоактивных семейства заканчиваются изотопами, содержащими либо 82 протона, либо 126 нейтронов, либо и то и другое. Также мы уже отмечали по кривой удельной энергии связи особенно сильную связь в ядре гелия-4 (2 протона и 2 нейтрона), кислорода-16 (8+8).

¹ Ещё раз обращаем внимание, на необходимость не воспринимать дословно некоторые термины ядерной физики. См. также сноску на стр. 63.

Существуют две простых модели устройства ядра, дающие наглядное представление о природе этих зависимостей. Рассмотрим их подробнее.

Капельная модель ядра.

Капельная модель ядра была создана Н.Бором и К.Вайцекером в 30-х годах 20 века. Это полуфеноменологическая модель рассматривает ядро, как каплю несжимаемой жидкости, и подбирает различные вклады в полную энергию связи.

Во-первых, это связанная с объёмом ядра энергия $E_V = \alpha A$. Это выражает наблюдаемое насыщение ядерных сил, каждый нуклон взаимодействует только с ближайшими и все нуклоны равноценны — поэтому эта энергия пропорциональна числу нуклонов. Во-вторых — поверхностная энергия $E_S = -\beta A^{2/3}$. Эти вклады феноменологические, они написаны по тем же соображениям по которым в термодинамике энергия разбивается на объёмную и поверхностную. Эта аналогия, однако, здесь применяется к системе, содержащей максимум пару сотен частиц, а не $\sim 10^{23}$ частиц, как в термодинамике. Степень $2/3$ в поверхностной энергии выражает простую геометрическую связь объёма и поверхности для сферической капли. Знак «минус» в поверхностной энергии выражает меньшую связанность приповерхностных нуклонов, то есть поверхностная энергия показывает, насколько меньше связаны с соседями нуклоны в приповерхностном слое по сравнению с нуклонами в глубине ядра.

Далее, протоны являются одноимённо заряженными частицами и они испытывают кулоновское отталкивание $E_K = -\gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}}$. Степень $1/3$ в знаменателе имеет геометрическую природу, описывает связь радиуса сферы (задающего характерное расстояние между частицами) и объёма. В числителе выражен тот факт, что каждый протон взаимодействует со всеми и эту энергию надо просуммировать по всем протонам, различием Z^2 и $Z(Z-1)$ с точностью нашей модели пренебрегаем.

С учётом только этих вкладов при фиксированном Z энергия связи будет неограниченно расти с ростом числа нейтронов N - то есть с учётом только этих вкладов капельная модель предсказывала бы стабильность ядер с большим избытком нейтронов, что не соответствует наблюдаемым данным (рисунок 44).

Для ограничения этого роста числа нейтронов необходимо рассмотреть квантовые эффекты. Нейтроны и протоны движутся в ограниченной области пространства, их движение квантовано. В грубом приближении можно считать, что в стационарных состояниях внутри ядра должны формироваться стоячие волны де Бройля для протона и нейтрона. Эти стоячие волны будут отличаться числом полувольт, уложившихся внутри ядра, и, следовательно будут различаться их энергии. Энергия этих состояний определяется массой частицы, которая почти одинакова у обоих нуклонов, и размером ядра. Таким образом, структура квантовых уровней примерно одинакова и для протонов, и для нейтронов. Кроме того, и нейтроны и протоны являются фермионами, поэтому только две частицы могут находиться в одном квантовом состоянии (так как протон и нейтрон — разные частицы, то запрет Паули действует независимо на нейтронную и протонную подсистемы). Таким образом, «заполняя» ядро протонами и нейтронами из-за действия запрета Паули мы вынуждены заполнять последовательно уровни с нарастающей энергией. Если число протонов и нейтронов сильно отличается (пусть для определённости имеется избыток протонов), то энергия некоторых протонов окажется выше энергии самых высокоэнергетичных нейтронов. Тогда становится выгодным понижение энергии протонной подсистемы за счёт позитронного бета распада. Этот эффект стремится поддерживать равные числа нейтронов и протонов,

феноменологически его можно описать вкладом в энергию вида $E_{сим} = -\epsilon \frac{(A/2 - Z)^2}{A}$.

Такой вклад обращается в ноль для ядра содержащего поровну протонов и нейтронов, знаменатель описывает уменьшение важности дисбаланса нейтронов и протонов с ростом массы ядра.

Наконец, ещё один вклад в энергию связи ядра связан с наблюдаемой на эксперименте тенденцией нуклонов объединяться в пары (нейтрон-нейтрон и протон-протон). Из-за этого более стабильны оказываются ядра с чётным числом протонов и нейтронов (чётно-чётные ядра), за ними идут ядра, содержащие чётное число частиц только одного типа (чётно-нечётные ядра) и наконец наименее выгодны нечётно-нечётные ядра. Этот вклад описывают формулой $E_{спар} = k \frac{\delta}{A^{3/4}}$, где $k=1$ для чётно-чётных ядер, $k=0$ для чётно-нечётных и $k=-1$ для нечётно-нечётных ядер. Это слагаемое иногда записывают в другом виде (с другой степенью A или вообще в независимом от A виде, но при этом всегда сохраняется знакопеременный в зависимости от чётности характер.

Окончательно получаем в этой модели:
 $E_{св} = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma Z^2 A^{-1/3} - \epsilon (A/2 - Z)^2 A^{-1} + k \delta A^{-3/4}$. Коэффициенты этой формулы находятся из обработки экспериментальных данных, их примерные значения $\alpha=14.03$, $\beta=13.03$, $\gamma=0.5835$, $\epsilon=77.25$, $\delta=34.57$ (все параметры в МэВ).

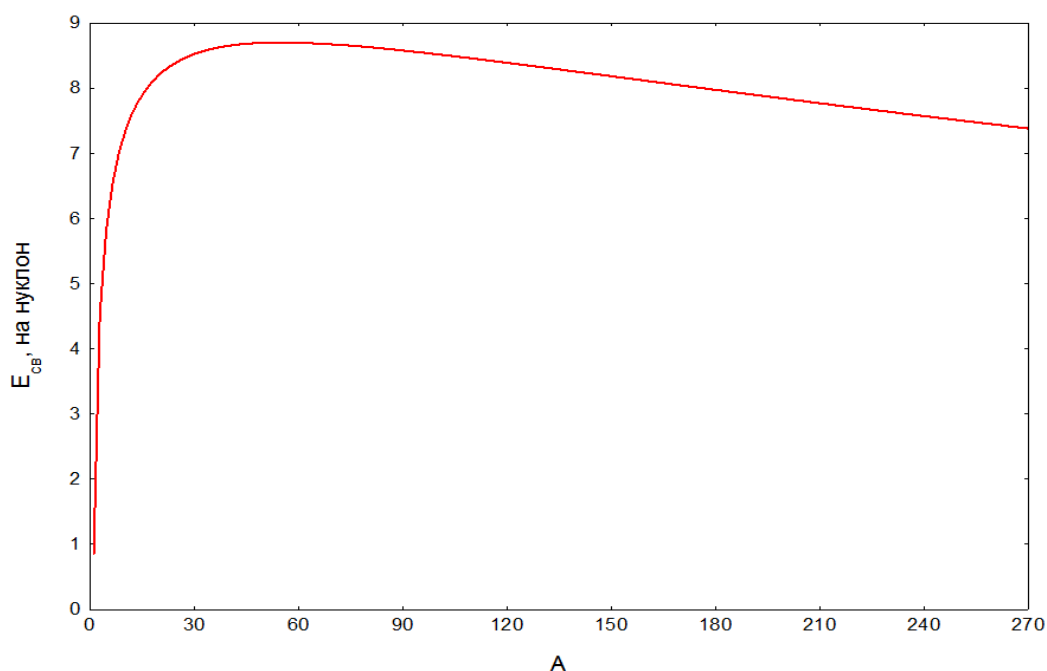


Рисунок 45 Вычисленная по формуле Вайцекера удельная энергия связи.

Формула Вайцекера воспроизводит энергию связи тяжёлых ($A \sim 100$) ядер с точностью около 1% (рисунок 45, сравните с рисунком 43). Также при помощи формулы Вайцекера можно найти положение «долины стабильности»: значение заряда ядра Z , соответствующее максимуму энергии связи при фиксированном числе нуклонов A . Из вида формулы видно, что график зависимости $E_{св}(Z)$ будет параболой с направленными вниз ветвями, так что максимум действительно существует. Находим его положение, дифференцируя по Z :

$$\frac{d E_{св}}{dZ} = -2 \gamma Z A^{-1/3} + 2 \epsilon (A/2 - Z) A^{-1} = \epsilon - 2 (\gamma A^{-1/3} + \epsilon A^{-1}) Z = 0$$

$$\left. \frac{Z}{A} \right|_{\text{опт}} = \frac{\epsilon}{2(\epsilon + \gamma A^{2/3})} \approx \frac{77}{2(77 + 0.58 A^{2/3})}$$

Действительно, получаем, что для лёгких ядер $Z/A=1/2$ (то есть число протонов и нейтронов равны), а для более тяжёлых ядер это отношение уменьшается, что соответствует избытку нейтронов. Вычисленные кривые (Рисунок 46) хорошо соответствуют экспериментально измеренному положению стабильных изотопов на плоскости ZN (рисунок 44). Это соответствие не является совсем удивительным, так как параметры формулы Вайцекера подобраны с учётом этих данных. Однако правильное функциональное описание зависимости $N(Z)$ показывает, что простая капельная модель действительно отражает по крайней мере часть физических процессов в ядре.

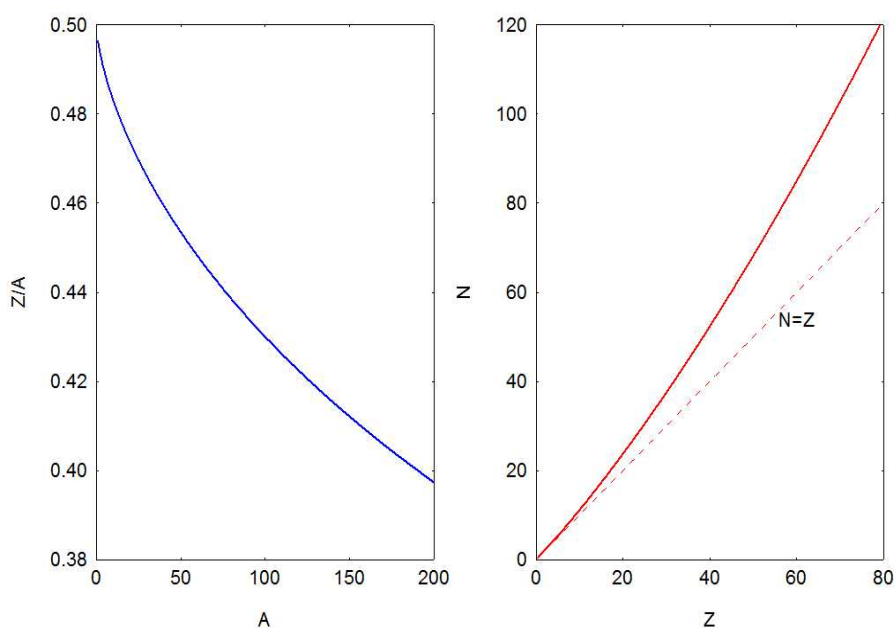


Рисунок 46: Вычисленные по формуле Вайцекера числа протонов, соответствующие наибольшей энергии связи. Левая панель - зависимость числа протонов от массы ядра, правая панель - зависимость числа нейтронов от числа протонов в ядре с максимальной энергией связи.

Оболочечная модель ядра.

За разработку этой модели в 1963 году Мария Гопперт Майер и Дж.Ханс Д. Енсен, совместно получили 1/2 Нобелевской премии, «за их открытия, касающиеся ядерной оболочечной структуры». Впервые похожий подход был предложен в работах советского физика Д.Иваненко в 1932 году.

Эта модель появилась для того чтобы объяснить повышенную стабильность так называемых «магических» ядер, содержащих 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 протонов или нейтронов, а также ещё большую устойчивость «дважды магических» ядер, в которых число и протонов и нейтронов содержится в этом ряде. Термин «магические ядра» был предложен Е.Вигнером (получившим вторую половину Нобелевской премии 1963 года), это было шутивное название, выражавшее недоумение физиков перед выделенностью некоторых ядерных составов, не объясняемых в капельной модели.

С появлением выделенных чисел мы уже сталкивались при рассмотрении структуры атома: из-за определённой симметрии электронных орбиталей возможны всего 2 s-состояния, 6 p-состояний, 10 d-состояний, 14 f-состояний, причём эти состояния могут заполняться только с определённого значения главного квантового числа, что в итоге приводило нас к объяснению структуры периодической таблицы Менделеева [7]. Однако, в отличие от задачи об атоме водорода, где электрон движется в поле точечного ядра, при рассмотрении ядра мы сталкиваемся сразу с задачей многих тел.

Ситуация, однако, облегчается тем, что все нуклоны являются ферми-частцами. Если рассмотреть некоторую стабильную конфигурацию ядра и добавить к ней ещё один нуклон, то окажется, что движение этого добавленного нуклона не может сильно возмутить «внутреннюю» конфигурацию. Система имеет дискретные уровни энергии, причём все нижние уровни заняты по предположению о стабильности конфигурации ядра. Принцип Паули запрещает двум одинаковым нуклонам находиться в одном состоянии. Таким образом, для существенного возмущения ядерной структуры необходимо передать одному из «внутренних» нуклонов большую энергию достаточную, для его перехода на один из высоколежащих свободных энергетических уровней. В результате оказывается, что движение нуклона среди многих других нуклонов можно на самом деле описать как его свободное движение в некотором эффективном потенциале. С аналогичным движением без рассеяния в плотной среде в физике сталкиваются при рассмотрении ферми-жидкости, одним из простейших примеров которой является электронный газ в металле, рассмотренный нами в курсе квантовой физики.

В качестве первого приближения для такого потенциала естественно взять гармонический потенциал $U = \frac{1}{2} M \omega^2 r^2 = \frac{1}{2} M \omega^2 (x^2 + y^2 + z^2)$. Трёхмерный осциллятор оказывается суперпозицией трёх одномерных случаев, уровни энергии описываются формулой, похожей на известную из курса квантовой физики $E_N = (N + \frac{3}{2}) \hbar \omega$, здесь $N = n_1 + n_2 + n_3$ сумма квантовых чисел для трёх осцилляторов. Такие уровни вырождены, так как одно и то же число N можно получить разными способами. Задача о подсчёте числа способов, которыми число N можно представить в виде суммы трёх неотрицательных целых чисел известна в комбинаторике, а для малых N ответ очевидно ищется перебором. Так $N=0$ собирается единственным способом, $N=1$ тремя способами (001, 010, 100), $N=2$ шестью способами (110, 011, 101, 200, 020, 002). Для произвольного N число способов равно $\frac{(N+1)(N+2)}{2}$. С учётом двукратного вырождения по спину получаем, что полностью заполненным уровням соответствуют следующие числа нуклонов:

- $N=0$: 2
- $N=1$: 8 (2 на нулевом уровне и 6 на первом)
- $N=2$: 20 (2+6+12)
- $N=3$: 40 (2+6+12+20)
- $N=4$: 70 (2+6+12+20+30)
- $N=5$: 112 (2+6+12+20+30+42)

Наша простая модель правильно воспроизводит начало «магического» ряда (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126), но потом сбивается. В более строгой теории учитывается отличие потенциала от гармонического, а также учитывается связь спиновой степени свободы с пространственным движением (так называемое спин-орбитальное взаимодействие). Эта более строгая теория

воспроизводит все «магические числа» правильно.

Причина повышенной стабильности магических и дважды-магических ядер заключается в том, что в них оказываются полностью заполнены ядерные оболочки до какого-то уровня. Примерами похожей стабильности являются инертные газы (не вступают в реакции), а также кристаллические нано- и микрочастицы (при полном заполнении очередного слоя они проявляют большую стабильность к химическим и физическим воздействиям).

Возбуждённые состояния ядра. Изомеры.

Обе простые модели ядра, рассмотренные выше, фактически считали ядро сферически симметричным. Однако это не обязательно должно быть так, хотя деформированные состояния и имеют как правило большую энергию — то есть соответствуют на языке квантовой физике возбуждённым состояниям ядра.

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 в капельной модели. Во-первых, это простая деформация капли, переход от сферической к вытянутой эллиптической форме. Такая деформация может быть описана модификацией формулы Вайцекера, учитывающей изменение поверхностной энергии при деформации. 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 $^{57m}_{27}\text{Co}$.

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 $^{180m}_{83}\text{Ta}$ 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 $^{178m2}_{72}\text{Hf}$ имеет период полураспада 31 год и является рекордсменом по энерговыделению (релаксирует с испусканием гамма-кванта с энергией 2.45 МэВ, 1 грамм этого изомера выделяет при релаксации энергию эквивалентную более чем 300 кг ТНТ), изомер хольмия $^{166m1}_{67}\text{Ho}$ 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.

Радиоактивностью или радиоактивным распадом называют явление испускания ядрами частиц или гамма-квантов, иногда¹ 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, разницы 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 47 [47].

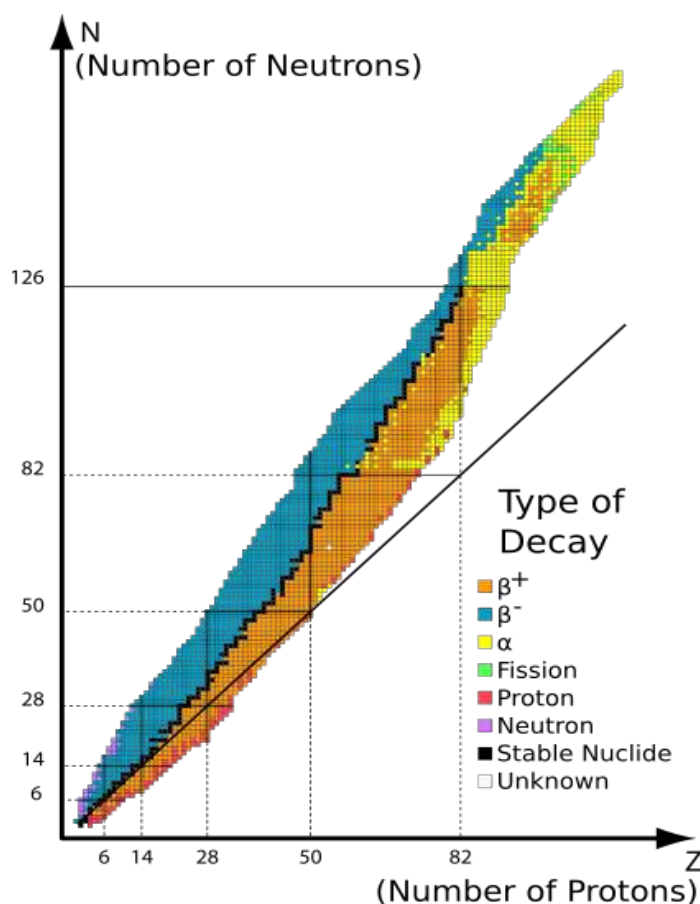


Рисунок 47: Виды радиоактивных распадов в зависимости от изотопа. С сайта [47].

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 этой теме можно рекомендовать сайт Лаборатории радиационного контроля ЛРК-1 МИФИ [48], подготовленные Общественным советом Госкорпорации «Росатом» брошюры [49], [50].

¹ 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.

Исторически, радиоактивность как физическое явление была обнаружена и исследована в 1896 году Антуаном Анри Беккерелем [51][52]. 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 наук². 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.

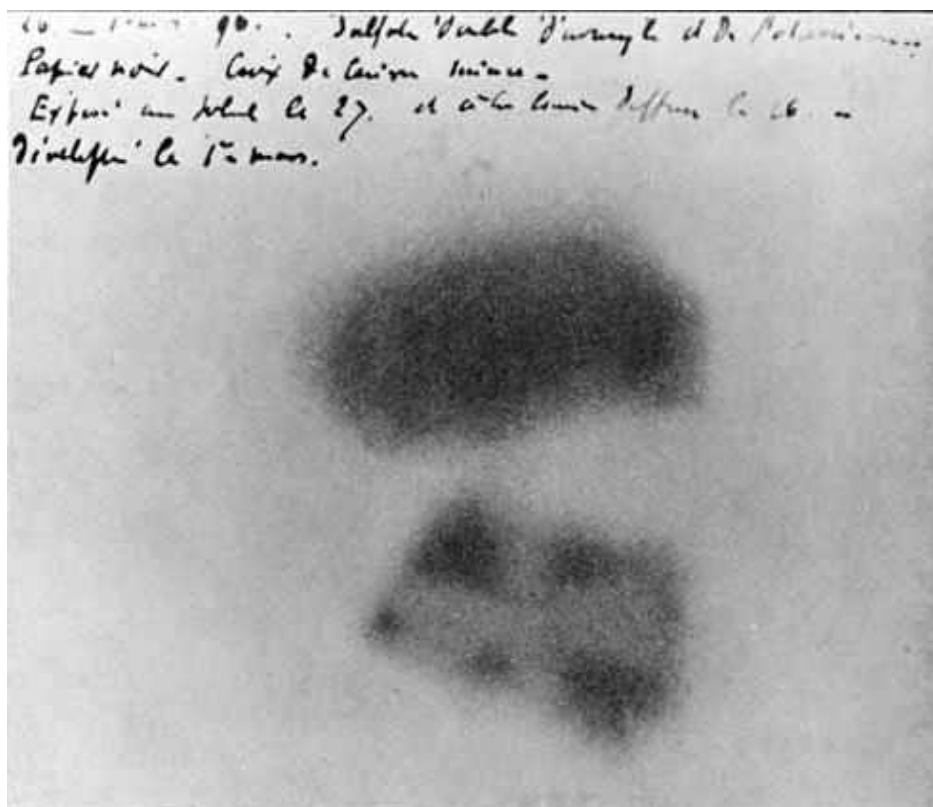


Рисунок 48: Изображение урановой соли на фотопластинке, полученное Беккерелем. Видна "тень" от мальтийского креста, помещённого между солью и фотопластинкой. С сайта [51].

² 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 49: Слева: Полированный срез минерала уранита (урановая смолка, урановая смоляная обманка). Справа: Радиационная засветка фотопластинки от контакта с образцом уранита. С сайта [52].

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 48, 49). 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 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 развитии 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 $T_{1/2}$:

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

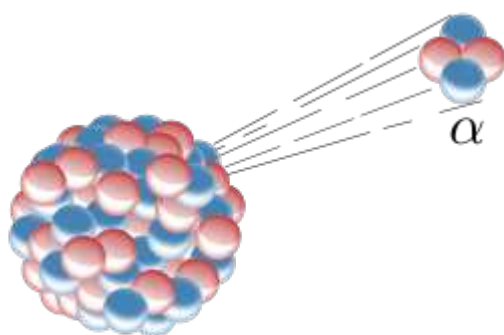
Радиоактивные препараты характеризуют активностью, равной числу распадов в секунду

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Активность измеряется в беккерелях (сокращённо Бк), один беккерель равен одному распаду в секунду. Активность является характеристикой не ядра, а всего препарата, она зависит от количества ядер в препарате. Видно, что активность, количество ядер в препарате и период полураспада (константа распада) связаны между собой простыми соотношениями, зная любые две величины можно найти третью. Внесистемная единица активности Кюри соответствует числу распадов в 1 грамме радия за секунду, $1 \text{ Кюри} = 3.7 \cdot 10^7 \text{ Бк}$.

Альфа-распад.

Альфа-распадом называется вид радиоактивного распада при котором ядро испускает альфа-частицу, то есть ядро атома гелия [53]. 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 50: Альфа-распад ядра (в представлении художника).

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-частиц¹.

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

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

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 43), что меньше чем энергия связи на нуклон в тяжёлых ядрах. Переходя к удельной энергии связи $\epsilon = E_{cs}/A$ можно показать что условие возможности распада превращается в:

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

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

¹ 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) [54].

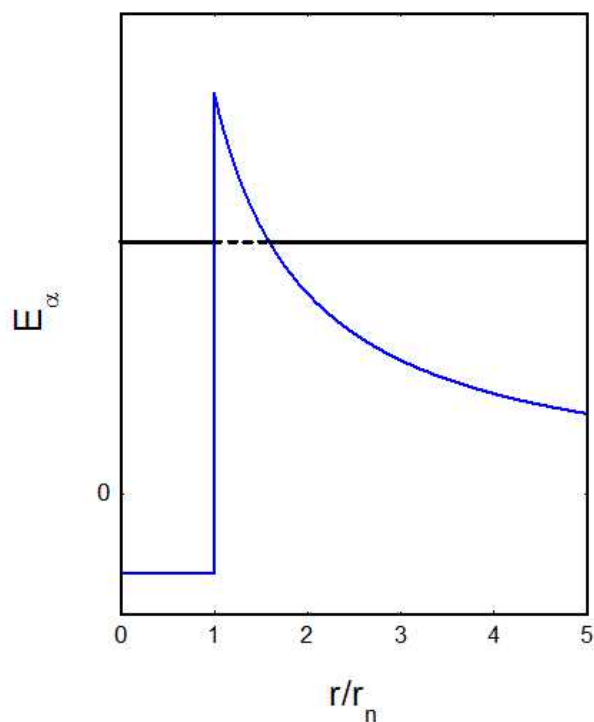


Рисунок 51: Потенциал, действующий на альфа-частицу (схема). Горизонтальная линия соответствует энергии альфа-частицы, пунктир показывает область, в которой альфа-частица с такой энергией существовать не может.

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.

Эмпирическое соотношение между энергией альфа-частицы и временем полураспада было найдено Гейгером и Нэттолом в 1911 году (закон Гейгера-Нэттола): $\lg T_{1/2} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b$ согласно этому закону при уменьшении энергии происходит рост *логарифма* времени полураспада, а сам период полураспада, следовательно, увеличивается экспоненциально быстро. Оценки показывают, что при энергии альфа частицы в 2 МэВ период полураспада превышает время жизни Вселенной.

Закон Гейгера-Нэттола был объяснён в работах Г.Гамова (и независимо Р.Гёрни и Э.Кондона) как процесс туннелирования четырёх нуклонов, образовавших альфа-частицу, через кулоновский барьер (см., например, [1]). Отметим, что внутри ядра все нуклоны движутся независимо — образование альфа-частицы внутри ядра это виртуальный процесс, однако когда альфа-частица покидает ядро, она становится вполне определённым объектом.

На альфа-частицу вне ядра действует кулоновский потенциал ядра-остатка
$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2(Z-2)e^2}{r}$$
 (двойка в числителе связана с зарядом альфа-частицы). Внутри ядра вступают в действие сильные ядерные силы, так что для нуклонов возникает минимум

энергии (потенциальная яма) внутри ядра (рисунок 51). Величина кулоновского потенциала на размере ядра (10^{-15} м) для $Z=80$ составляет 230 МэВ, то есть гораздо больше чем энергия вылетающей альфа-частицы. Из-за этого, даже если виртуальная альфа частица в ядре имеет избыток энергии, позволяющий ей существовать вне ядра, существует область вблизи ядра, в которой альфа частица существовать не может. Однако, в квантовой физике возможно проникновение через такой барьер (туннелирование). Решение задачи о туннелировании приводит к закону Гейгера-Нэттола, с коэффициентами слабо зависящими от заряда ядра $a \approx 1.6Z$ $b \approx -1.6Z^{2/3} - 21.4$ (при этом период полураспада выражается в секундах, а энергия в МэВ).

Спектр альфа-частиц (распределение по энергиям) состоит из одной или нескольких узких линий. Значения энергии частиц и вид спектра индивидуален для разных изотопов (рисунок 52) [55]. 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).

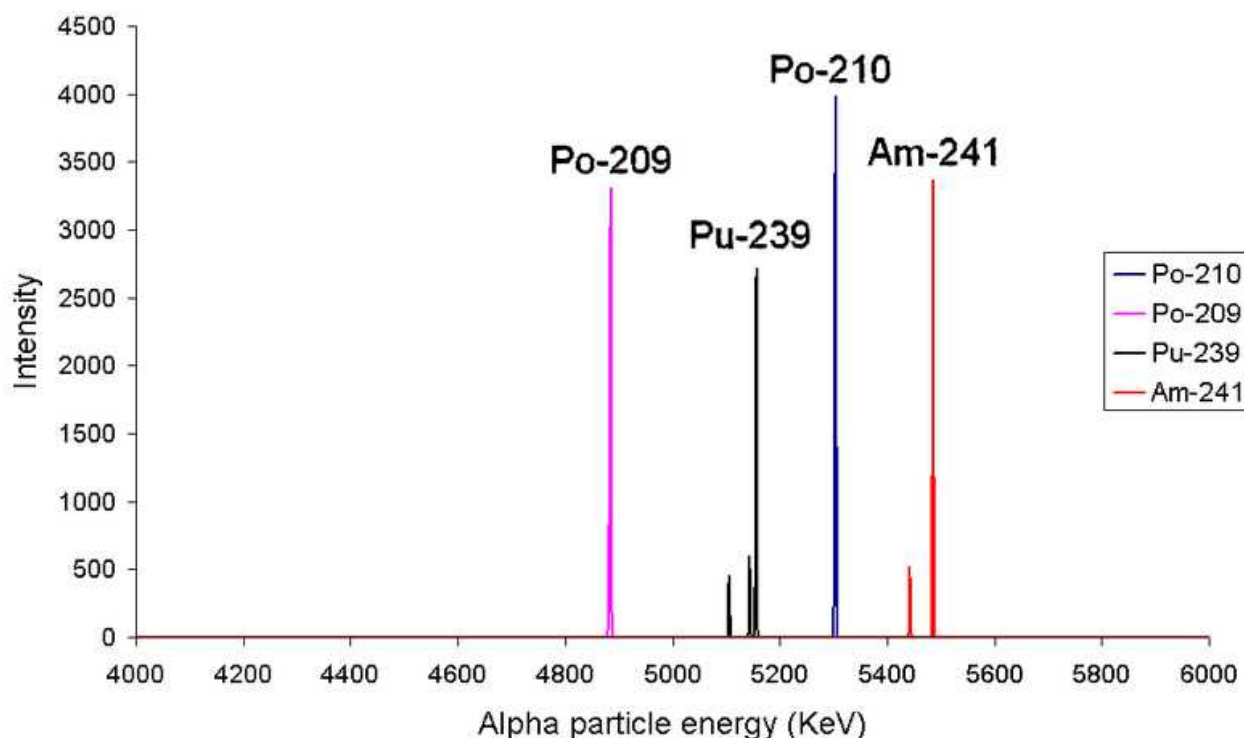


Рисунок 52: Спектры альфа-частиц от разных источников. С сайта [55].

Маленькая проникающая способность альфа-излучения позволяет использовать альфа-активные источники в некоторых практических приложениях [56]. Некоторые детекторы дыма используют альфа-активные изотопы для ионизации воздуха в зазоре между электродами (рисунки 53, 54). Частицы дыма увеличивают эффективное сопротивление зазора, которое может быть зафиксировано электроникой. Альфа-активные изотопы являются

предпочтительным источником энергии для радиоизотопных термоэлектрических генераторов [57]. 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 55). 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 53: Контейнер для амерция-241 в бытовом детекторе дыма. С сайта [56].



Рисунок 54: Капсула амерция-241 из бытового детектора дыма. Оболочка - алюминий, тёмный элемент в центре - диоксид амерция-241. С сайта [56].

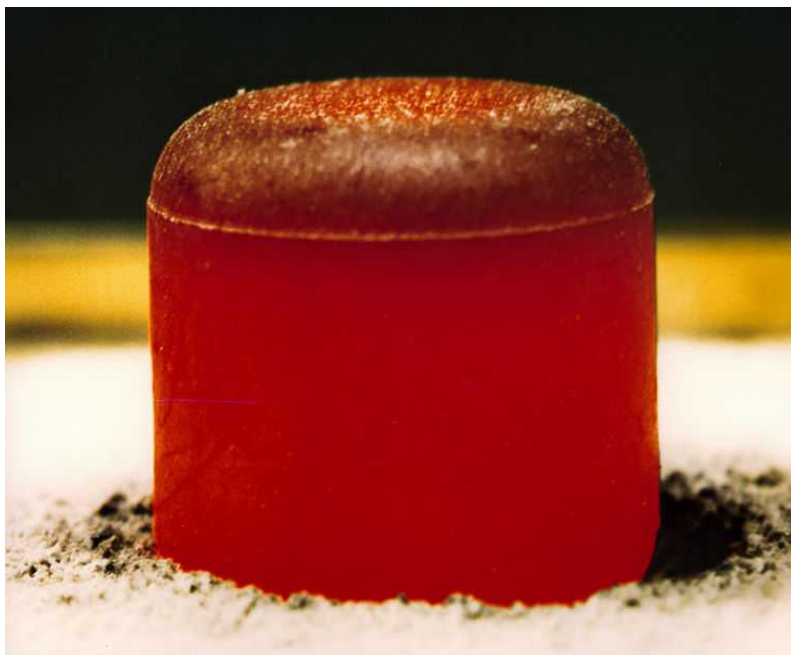


Рисунок 55: Таблетка оксида плутония $^{238}\text{PuO}_2$ для радиоизотопного термоэлектрического генератора космического зонда («Кассини» или «Галилео»). Цвет связан с тепловым излучением от разогретой альфа-частицами таблетки. С сайта [57].

Бета-распад.

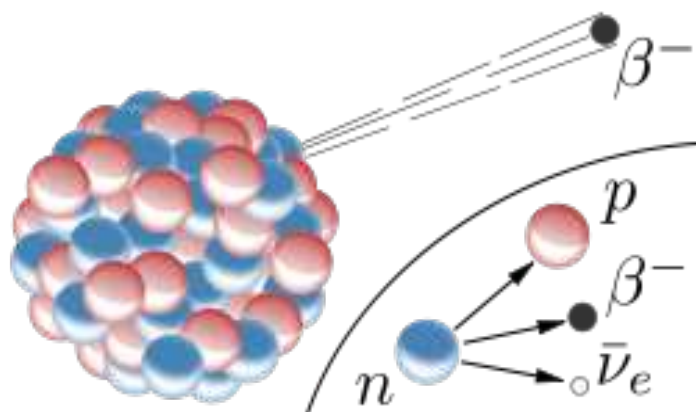


Рисунок 56: Электронный бета-распад (представление художника). На врезке в правом нижнем углу - продукты распада нейтрона. С сайта [47]

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 одну¹ 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.

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 [58], начинающийся с нулевых энергий (рисунок 57). 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.

¹ За исключением редко встречающихся процессов двойного бета-распада, о которых будет вкратце упомянуто ниже.

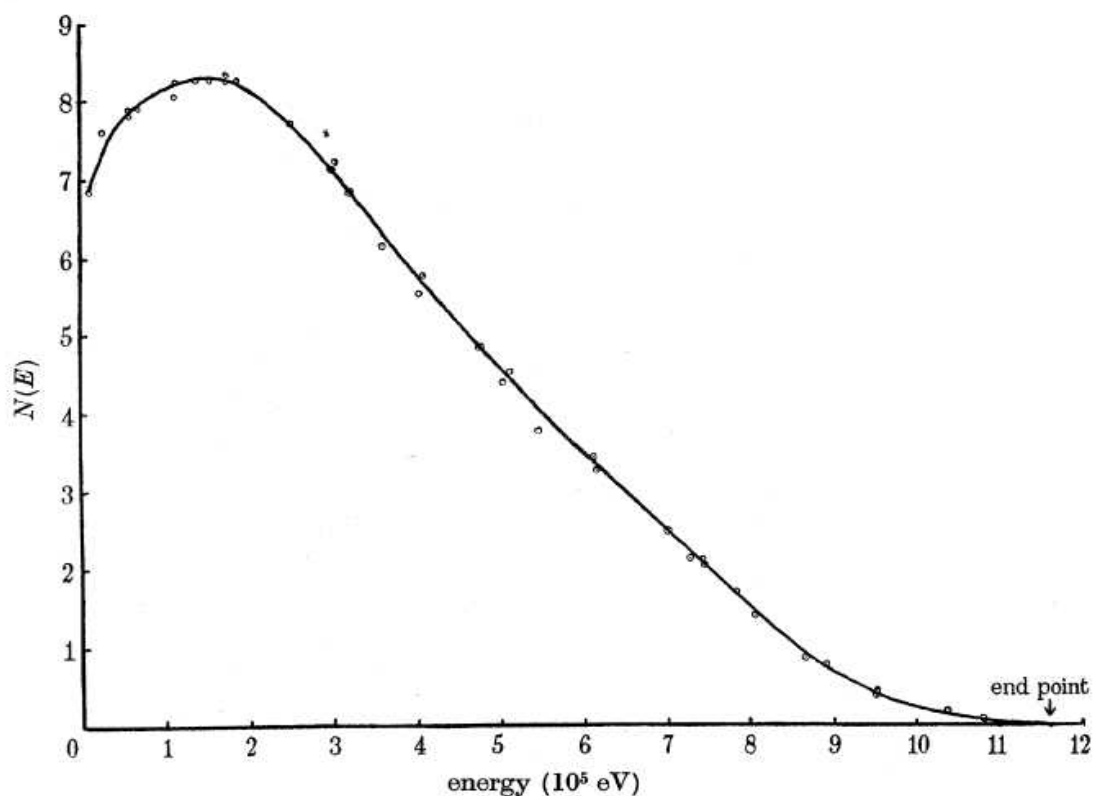


Рисунок 57: Энергетический спектр электронов при бета-распаде висмута-210. Из статьи [58].

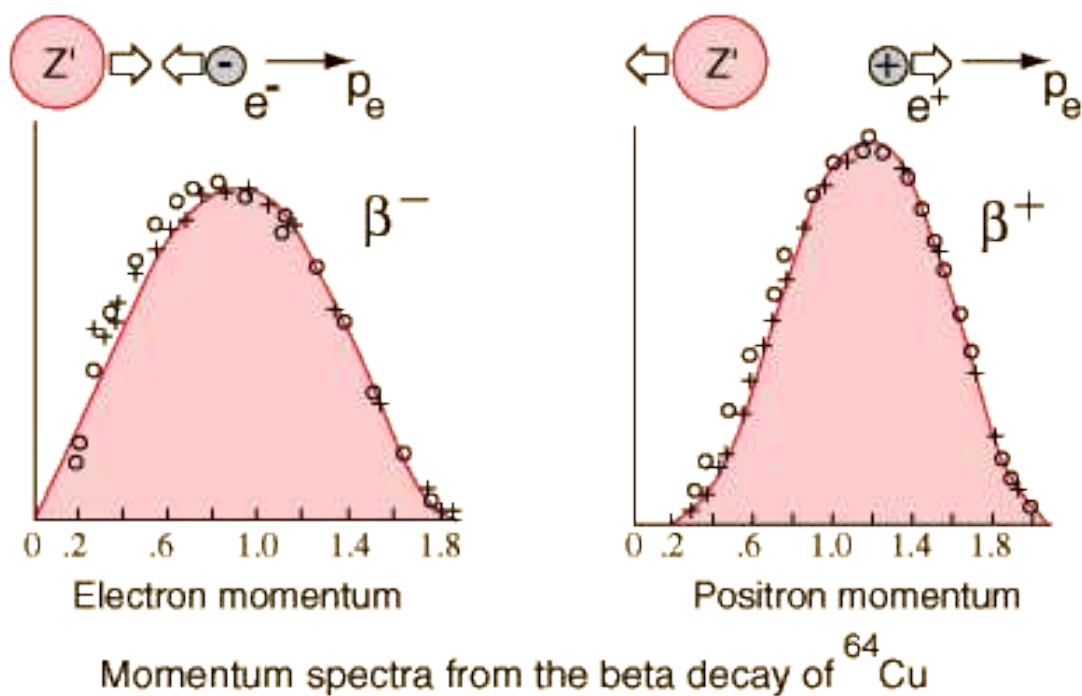


Рисунок 58: Распределение продуктов электронного (слева) и позитронного (справа) бета-распада меди-64. С сайта [5] (по работе J. R. Reitz, Phys. Rev. 77, 50 (1950)).

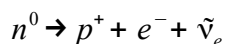
Электрон или позитрон являются заряженными частицами и взаимодействуют с ядром, из которого вылетели: электрон тормозится полем ядра, а для позитрона (как и ранее для альфа-частиц) должен быть потенциальный барьер внутри ядра. Однако, из-за меньшей массы покоя, эффекты туннелирования через кулоновский барьер в бета-распаде несущественны: дебройлевская длина волны электрона с энергией 1МэВ равна 10^{-12} м и много больше размера ядра. Небольшой вклад кулоновского взаимодействия в энергию вылетающих частиц присутствует, он очень чётко проявляется в спектрах бета-распада меди-64, способной как к электронному ($^{64}\text{Cu} \rightarrow ^{64}\text{Zn}$), так и к позитронному распаду ($^{64}\text{Cu} \rightarrow ^{64}\text{Ni}$). Из рисунка 58 видно, что позитроны движутся чуть быстрее электронов, что связано именно с взаимодействием с ядром после испускания частицы: позитроны отталкиваются, электроны — притягиваются.

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 импульса.

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

Электронный бета-распад или β^- -распад.

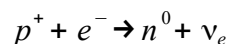
В этом процессе нейтрон испускает электрон и электронное антинейтрино, превращаясь в протон. Реакция распада:



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 $E(A, Z, N_e) > E(A, Z-1, N_e-1)$

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.

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:

$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$$

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 выгоды 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) [59]. 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.

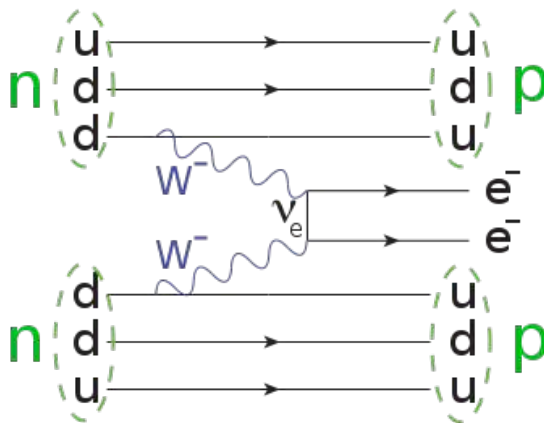


Рисунок 59: Диаграмма Фейнмана для гипотетического двойного безнейтринного бета-распада. С сайта [59].

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 [59]).

Интересно отметить, что одно и то же ядро может одновременно испытывать разные виды бета-распада: приведённые выше энергетические соображения о выгодности 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 [60], при которой используется процесс позитронного бета-распада. Затормаживающийся в тканях позитрон аннигилирует с электроном образуя пару гамма квантов, разлетающихся в противоположных направлениях¹, 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.

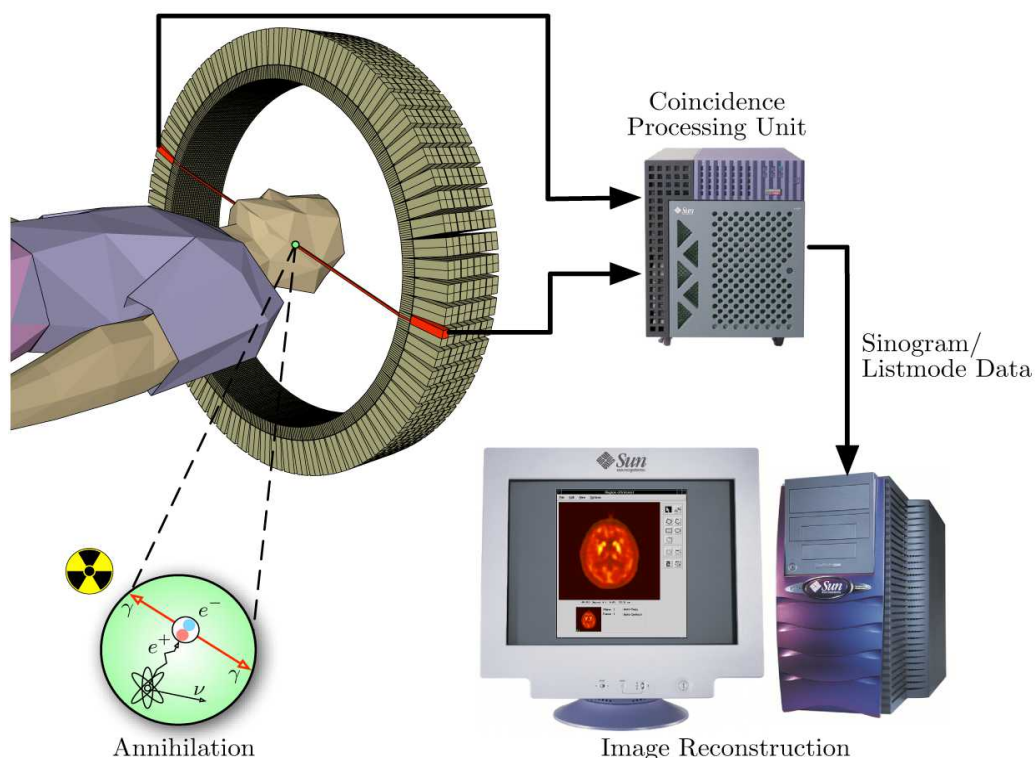
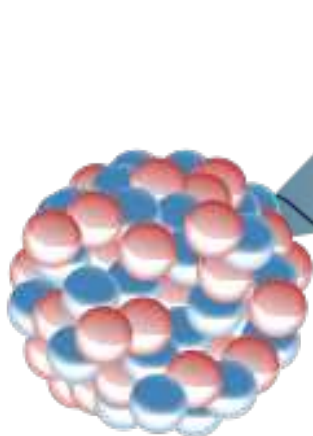


Рисунок 60: Схема работы позитронной томографии. С сайта [60].

¹ 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) [61]. 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 61: Гамма-распад (представление художника). С сайта [61].

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.

Протонный и нейтронный распады.

Как мы уже упоминали, избыточная энергия, превышающая энергию связи нуклона, может быть с подавляющей вероятностью передана протону или нейтрону с вылетом его из ядра. Эти процессы возможны только в очень нестабильных изотопах, так как связаны с самым сильным сильным взаимодействием. Поэтому такие процессы наблюдаются только в искусственно полученных ядрах.

Известно два изотопа, демонстрирующих нейтронный распад: гелий-5 (период полураспада $7 \cdot 10^{-22}$ сек) и бериллий-13 (период полураспада 0.5 нсек). Курьёзно, нейтронный распад гелия-5 можно формально назвать и альфа-распадом, так как продуктом этого распада является ядро гелия-4, то есть альфа-частица. При нейтронном распаде ядра (не путать с распадом нейтрона, являющимся процессом бета-распада) заряд ядра не изменяется, но уменьшается массовое число на единицу. Быстрота процесса нейтронного распада связана также и с тем, что для нейтрона отсутствует кулоновский барьер (у него нет электрического заряда). Поэтому при наличии энергии, превышающей энергию связи ничто не препятствует нейтрону покинуть ядро.

Протонный распад [62] является более распространённым, он был обнаружен в 1969 году на одном из изомерных состояний кобальта-53 (рисунок 62). При этом процессе заряд ядра

уменьшается на 1, как и при позитронном распаде, но также уменьшается и массовое число на 1. Обнаружено более 25 изотопов, демонстрирующих протонный распад. Для протона, как и для альфа-частицы, процесс распада является туннелированием под кулоновским барьером.

Помимо однопротонного распада, в 2002 году был обнаружен двухпротонный распад железа-45 [63]. В таком процессе уменьшаются на 2 и заряд ядра и массовое число. В железе-45 период полураспада 1.9 мсек, двухпротонный распад происходит с вероятностью 75%. Цепь распадов железа-45 показана на рисунке 63 [64]. Интересно подчеркнуть, что этот новый вид распада был обнаружен почти 100 лет спустя после начала исследования радиоактивности. Отметим также, что железо-45 является очень лёгким изотопом железа: природное железо в основном состоит из железа-56, то есть в железе 45 сильный дефицит нейтронов (или, с другой стороны, большой избыток протонов).

Процесс двухпротонного распада интересен ещё и тем, что связанное состояние двух протонов (дипротон или гелий-2) было бы стабильно, если бы сильное взаимодействие было всего на несколько процентов сильнее. При этом, как и для альфа-частиц, дополнительный выигрыш в энергии связи мог бы сделать такие процессы распада более вероятными. Поэтому детальное изучение двухпротонного распада позволяет получить оценку на параметры сильного взаимодействия.

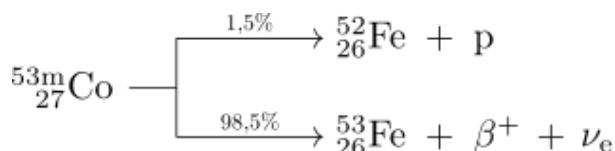


Рисунок 62: Пути распада изомерного состояния кобальта-53. С сайта [62].

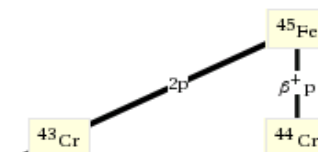


Рисунок 63: Схема распада железа-45. С сайта [64].

Наблюдались и трёхпротонные процессы распада в железе-45 [65] и хrome-43 [66]. Эти распады происходили, если после бета-распада (позитронного бета-распада для этих ядер) дочернее ядро оказывается в сильно возбуждённом состоянии с избытком протонов. Ядра хрома-43 или железа-45 получают бомбардировкой мишени тяжёлыми ионами (в работе [66] никелевая мишень бомбардировалась ионами никеля). Хром-43 уже сильно дефицитен по нейтронам (стабильный наиболее распространённый изотоп имеет массу 52), однако он претерпевает позитронный бета-распад с периодом полураспада около 20 мсек, превращаясь в ванадий-43 в возбуждённом состоянии ядра. С вероятностью около 80% энергия возбуждения дочернего ядра ванадия снимается испусканием одного протона, с вероятностью около 7% - испусканием двух протонов и с вероятностью около 0.1% (десяток зафиксированных событий на десять тысяч изученных распадов) — с испусканием трёх протонов. Примеры изображений с детектора частиц, показывающие как из покоящегося ядра хрома-43 [66] вылетают один, два или три протона показаны на рисунке 64.

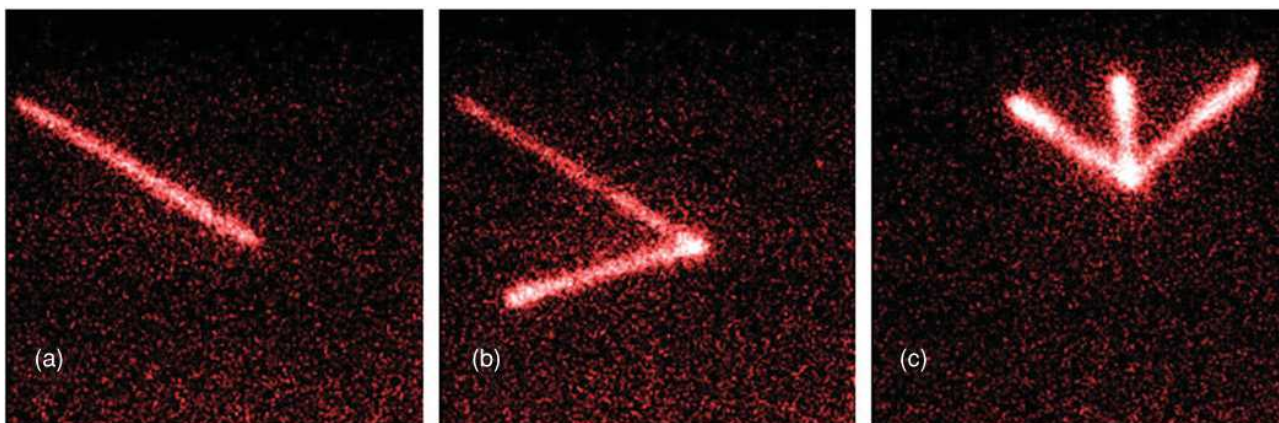


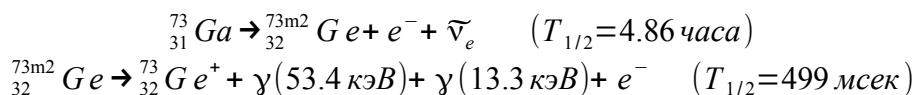
Рисунок 64: Оставленные в детекторе следы однопротонного (a), двухпротонного (b) и трёхпротонного (c) распадов образующегося после позитронного распада хрома-43 ядра ванадия-43. Из статьи [66].

Запаздывающие излучения.

Возможны ситуации, когда после распада исходного ядра по одному из описанных способов образуется крайне короткоживущий изотоп или возбуждённое состояние ядра, которое быстро (мгновенно на масштабе времени периода полураспада первого ядра) испытывает следующий распад. В результате количество промежуточных ядер мало, исходные ядра постепенно исчезают, а появляются ядра — конечные продукты двухступенчатой реакции.

Частицы, образовавшиеся на втором этапе называют запаздывающими, так как они образуются через некоторое время после начала отсчёта времени. Такие запаздывающие нейтроны оказываются принципиально важными для регулирования управляемых ядерных реакций.

Примеры запаздывающих излучений:



во второй реакции образуются запаздывающие гамма-кванты и конверсионный электрон.

Изотоп азота ${}^{17}\text{N}$ имеет три канала распада (электронный бета-распад с различными запаздывающими излучениями). С вероятностью 95% после бета-распада испускается запаздывающий нейтрон, образуется кислород-16, с вероятностью 5% происходит «чистый» бета-распад с образованием кислорода-17, с вероятностью $2.5 \cdot 10^{-5}$ происходит испускание запаздывающей альфа-частицы с образованием углерода-13.

Выше мы привели примеры запаздывающего многопротонного распада в ядрах хрома-43.

В схемах распада на участках с испусканием запаздывающего излучения пишут подряд оба символа (например, $\beta^{-}n$ для обозначения бета-распада с запаздывающим нейтроном). На диаграмме распадов для железа-45 (рисунок 63) таким образом отмечен распад в хром-44: процесс $\beta^{+}p$ обозначает запаздывающее излучение одного протона после позитронного бета-распада, в результате чего масса ядра уменьшается на 1, а заряд — на 2.

Лекция 3. Реакции ядерного деления и синтеза. Примеры ядерных реакций в природе и технике.

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 1-10 эВ, 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 [67].

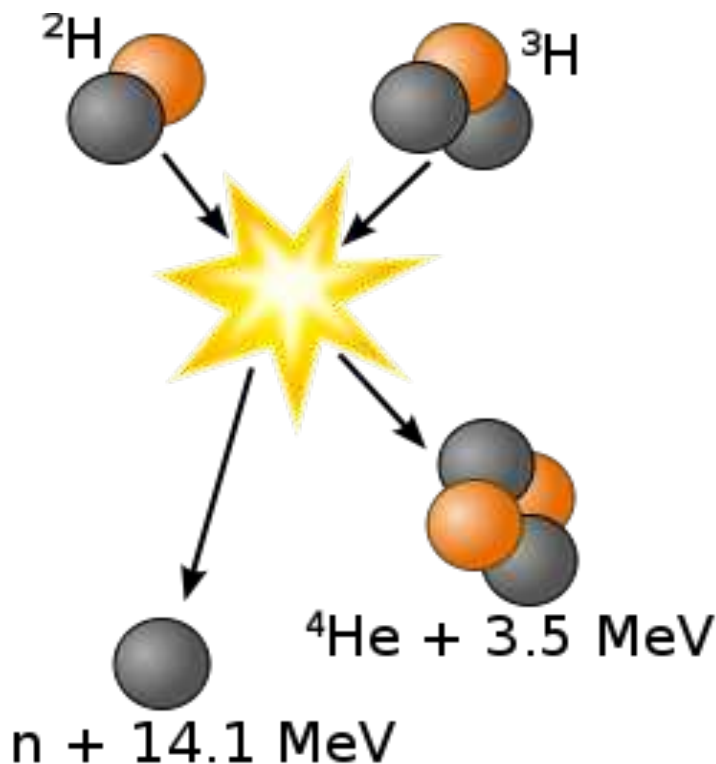


Рисунок 65: Реакция слияния дейтерия и трития в представлении художника. С сайта [67].

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 сблизались 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. Мы уже делали оценку высоты кулоновского барьера при альфа-распаде (~ 200 МэВ). Для лёгких ядер эта оценка чуть более оптимистична, так как меньше заряд ядра, но всё равно велика. Для двух протонов потенциальный барьер составляет $U_{H-H} = k \frac{e^2}{r_n} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2}{10^{-14} \dots 10^{-15}} = 0.15 \dots 1.5 \text{ МэВ}$. Его преодоление требует наличия у протона достаточной кинетической энергии, соответствующей 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 1 эВ соответствует температуре примерно 10^4 К , то есть речь идёт о температурах $10^8 - 10^{10} \text{ К}$).

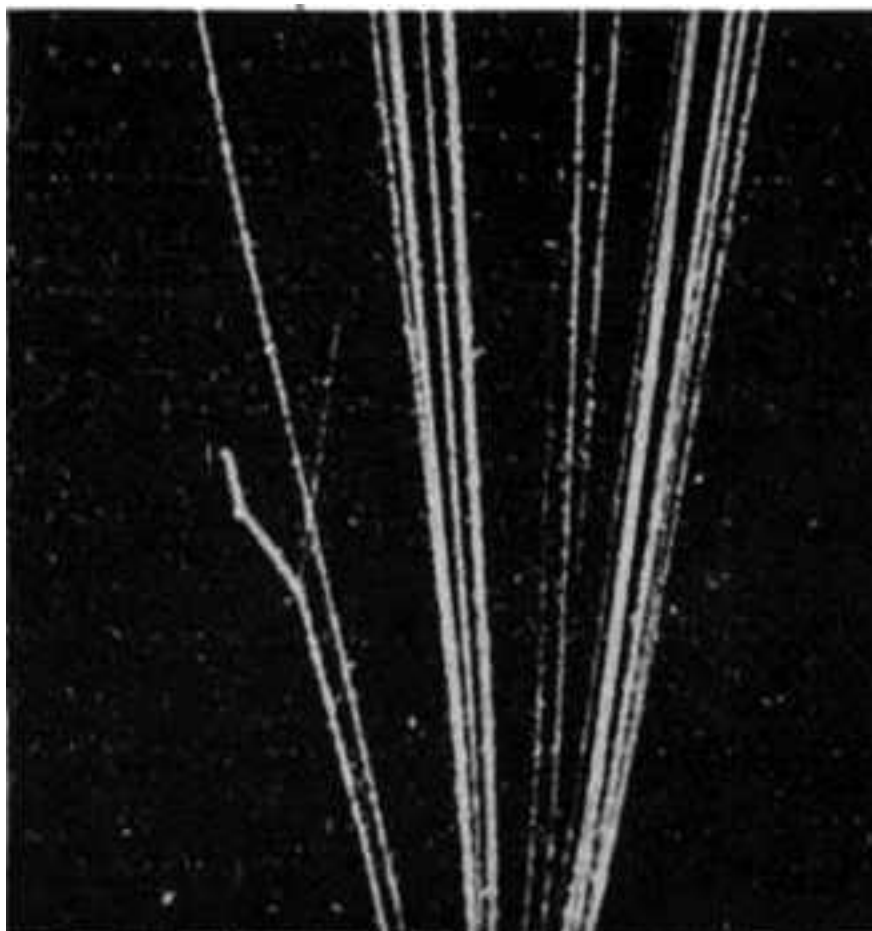
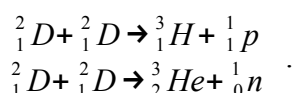


Рисунок 66: Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке. Из работы [68].

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 [68]. 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 66) 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 [69], [70] образование гелия-3 и трития при слиянии двух дейтронов:



Спонтанное и индуцированное деление ядер.

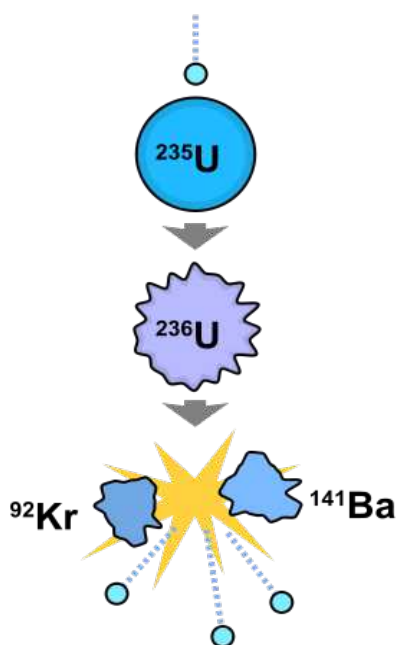


Рисунок 67: Деление урана-235 представлении художника. сайта[71].

Для тяжёлых ядер энергетически оказывается возможным процесс, когда ядро делится на две, обычно примерно равные, части. Этот процесс называют делением ядер [71]. 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 атомов 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.Петражом. 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 получило своё простое объяснение в рамках капельной модели ядра (рисунок 68). Рассмотренная нами простая капельная модель предполагала сферически-симметричную форму ядра. Однако, если форма ядра отклоняется от сферической (после поглощения нейтрона или спонтанно), то возникает конкуренция нескольких вкладов в энергию. С одной стороны, поверхностная 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 69) [72]. Цепную реакцию характеризуют коэффициентом размножения k , равным, по определению, отношению количества нейтронов следующего поколения к количеству нейтронов предыдущего поколения. Коэффициент размножения определяется количеством радиоактивного вещества, а также условиями в которых это вещество находится: наличие замедлителя, отражателя, поглощающих элементов, форма и распределение в пространстве радиоактивного вещества. При $k > 1$ реакцию называют надкритической, количество делений в единицу времени возрастает, цепная реакция «разгоняется», пока не будет остановлена какими-то меняющимися внешними факторами, либо развивается взрывообразно. При $k < 1$ реакцию называют подкритической, количество образующихся нейтронов и количество делений убывает со временем, цепная реакция «гаснет». Случай $k = 1$ называют критическим, в этом режиме работают ядерные реакторы.

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 0.5-1.0 МэВ. Соответственно, выделение энергии на одно деление ядра составляет 100-200 МэВ. Как и в случае синтеза, эта энергия в миллионы раз больше характерной энергии химической связи.

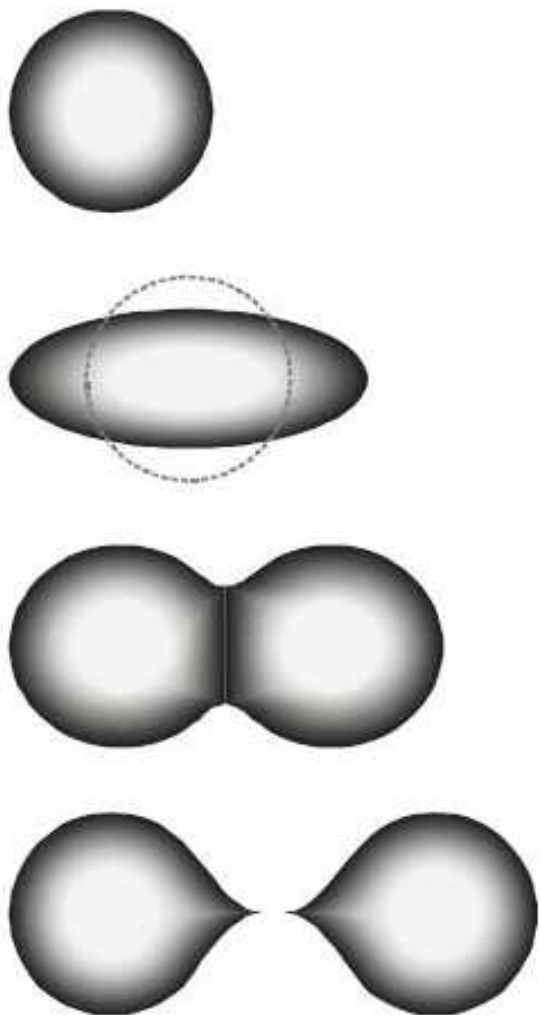


Рисунок 68: Деление в капельной модели. С сайта [71].

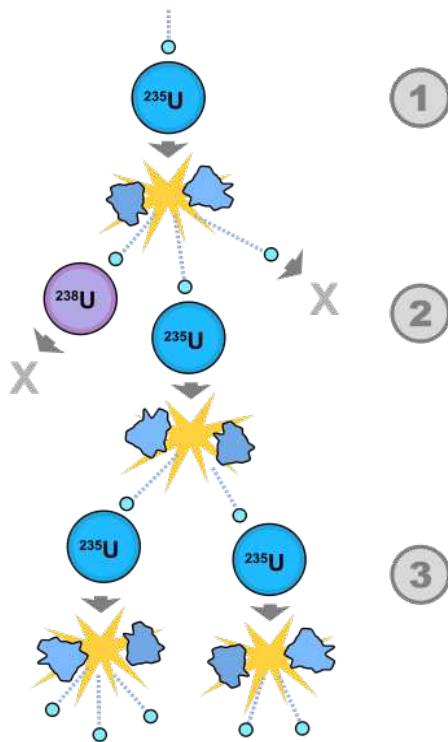


Рисунок 69: Цепная реакция деления урана-235. Стадия 1 - исходный атом поглощает нейтрон и делится с образованием трёх нейтронов. Стадия 2 - один из нейтронов поглощается ядром урана-238 без деления, один покидает активную зону, а один вызывает следующее деление. Стадия 3 - образовавшиеся при делении урана-235 на второй стадии нейтроны вызывают деление новых ядер урана-235. С сайта [72].

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, [73], [74], [75]). 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 кг/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 [76].

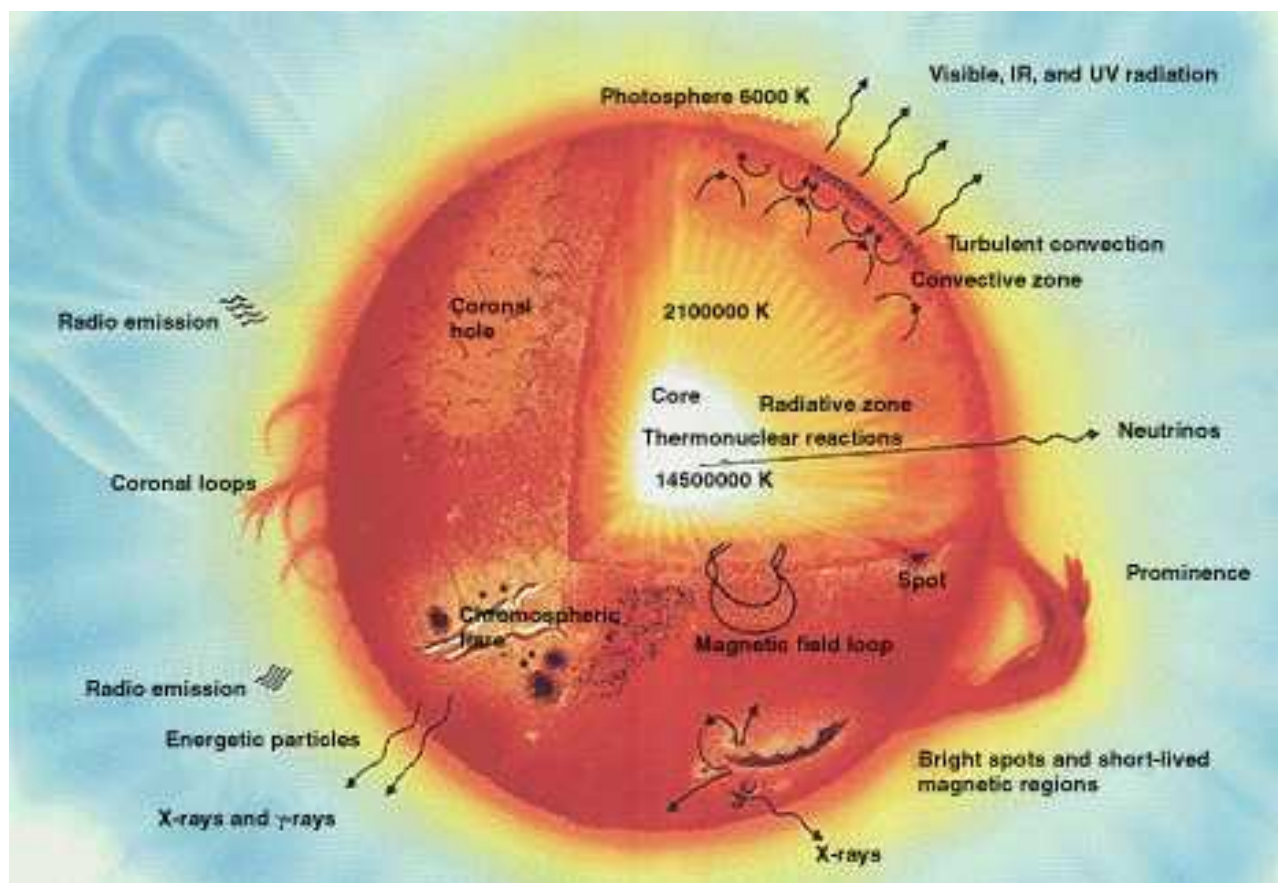


Рисунок 70: Структура Солнца. С сайта.

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 71) [77].

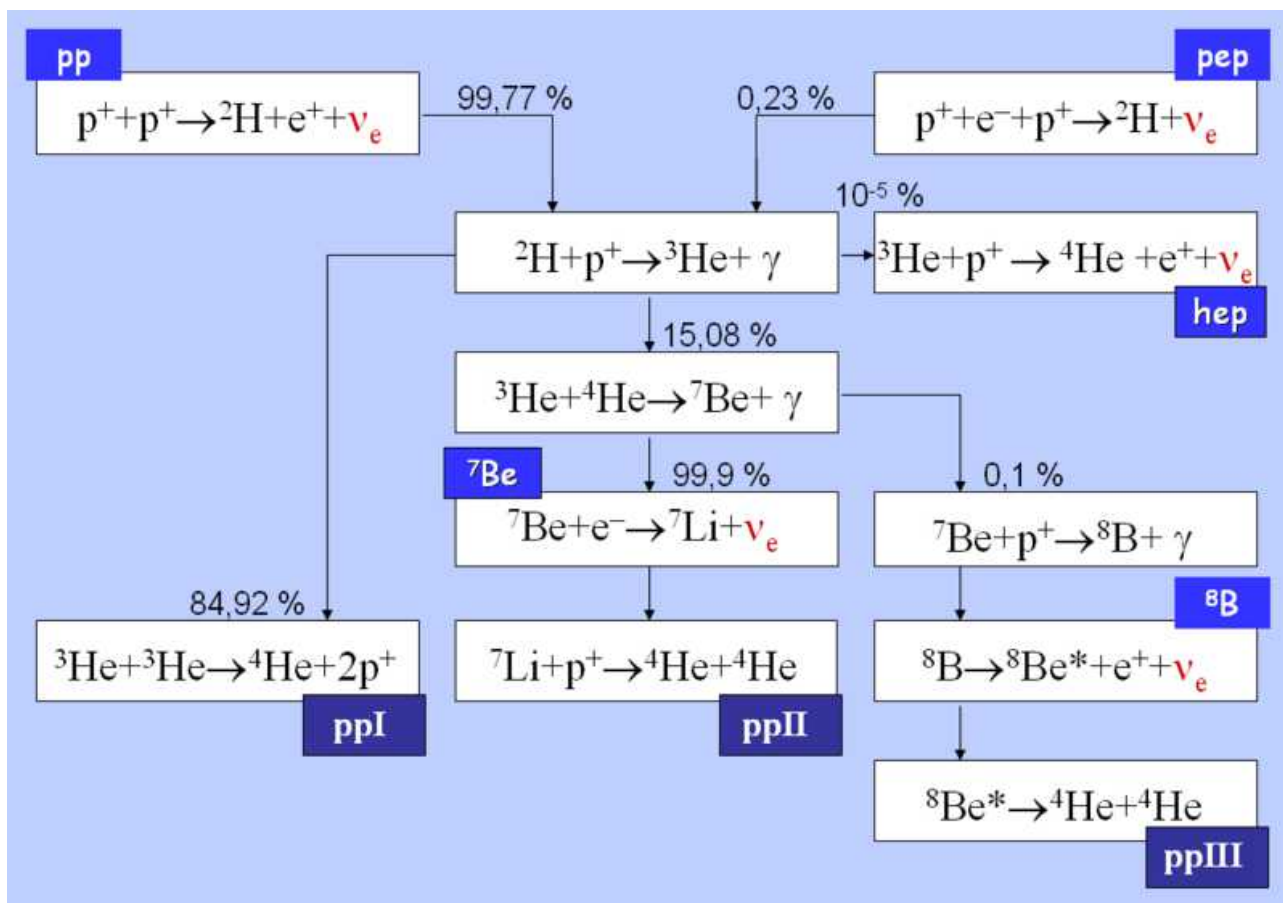
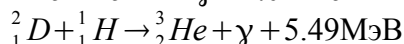
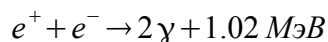
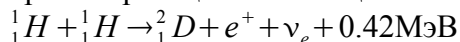


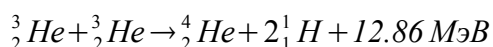
Рисунок 71: Схема ветвей протон-протонной цепочки термоядерных реакций. С сайта [77].

Первыми реакциями этой цепочки является синтез дейтерия и гелия-3:

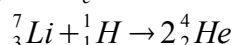
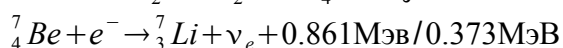
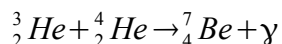


Далее возможно несколько путей дальнейших реакций, зависящие от температуры ядра звезды.

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

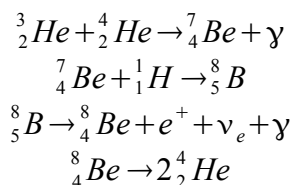


ppII ветвь (на Солнце происходит с вероятностью 14-15%, является доминирующей реакцией при температурах 14-23 миллиона градусов):



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

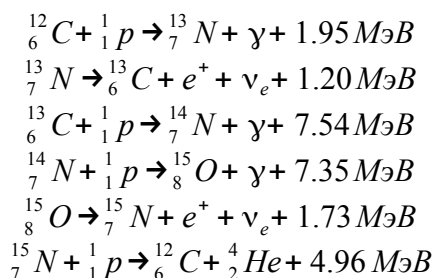
ppIII ветвь (на Солнце происходит с вероятностью 0.11%, но важна как источник энергетических нейтрино, становится доминирующей при температуре выше 23 миллионов градусов):



энергия нейтрино на предпоследнем этапе может достигать 14.06 МэВ.

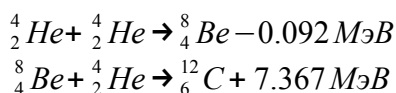
В основной ppI ветви из 4 протонов получается одно ядро атома гелия, дефицит массы составляет 0.7%, полный выход этой реакции 26.73 МэВ. Нейтрино уносит 2% этой энергии, остальная энергия выделяется в виде гамма-квантов, давление которых противодействует гравитационному сжатию. В ветвях ppII и ppIII 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 [73] 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 горения¹, 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:

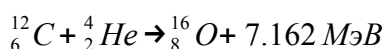


таким образом, в цикле из 6 реакций поглощается 4 протона и нарабатывается одна альфа-частица, ядро углерода-12 выступает «катализатором» этой реакции, возобновляясь к концу цикла. Нейтрино уносят около 5% энергии в этом цикле.

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:



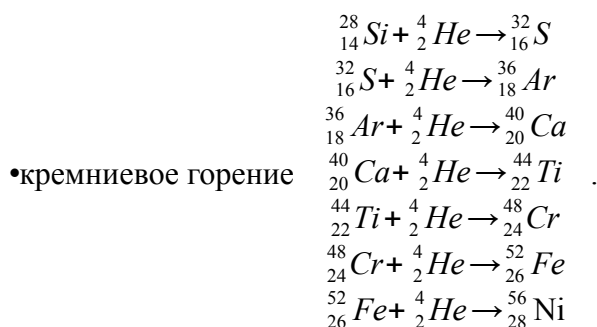
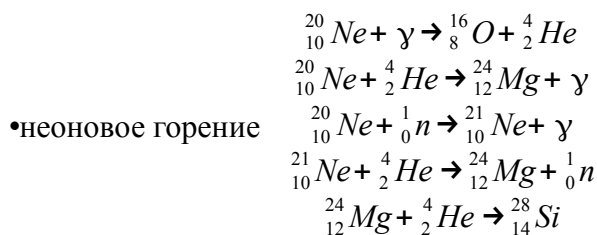
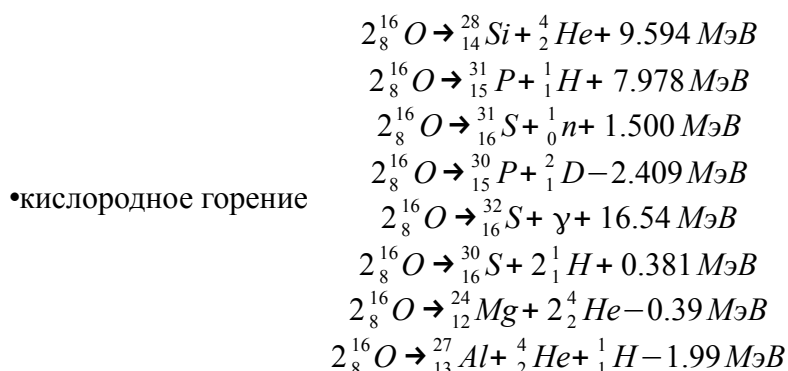
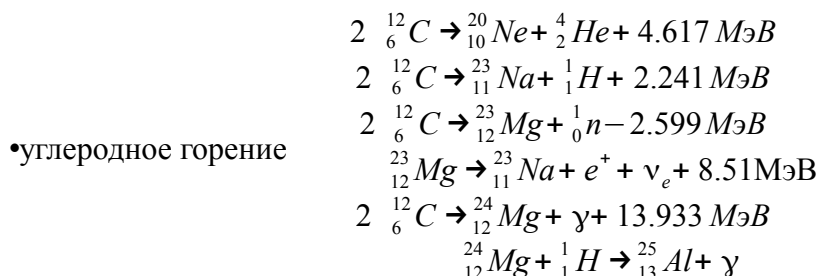
промежуточный изотоп бериллий-8 неустойчив (период полураспада 10^{-16} сек, распад на две альфа-частицы), но в условиях высокой плотности ядра звезды он успевает провзаимодействовать с альфа-частицей. Здесь же возможны реакции образования кислорода-16:



¹ 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).

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:



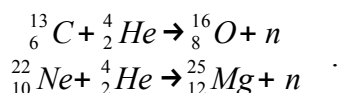
Конечным продуктом кремниевого горения является никель-56, который через цепочку распадов ($\text{ } ^{56}_{28}\text{Ni} \rightarrow (6 \text{ дней}) \rightarrow \text{ } ^{56}_{27}\text{Co} + e^+$, $\text{ } ^{56}_{27}\text{Co} + e \rightarrow (77 \text{ дней}) \rightarrow \text{ } ^{56}_{26}\text{Fe}$)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

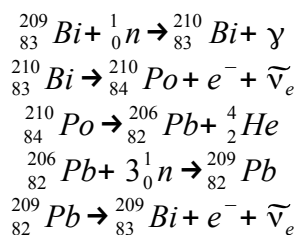
нейтронной звезды и следующее за этим гравитационное сжатие внешних слоёв звезды, разгоняющихся до релятивистских скоростей. Удар внешних оболочек звезды о практически несжимаемое ядро приводит к выделению энергии, отразившись от ядра содержимое внешних слоёв разлетается, открывая горячее ядро — происходит 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:



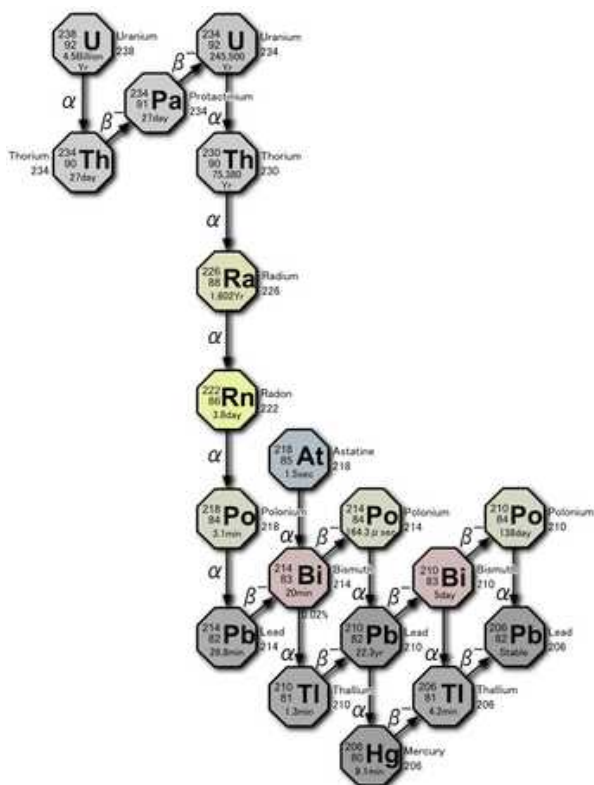
Совокупность всех этих реакций (звёздный нуклеосинтез) позволяет описать наблюдаемое во Вселенной распределение элементов.

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 72) [78] 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 артезианских). Радон альфа-активен с периодом полураспада чуть более 3 дней, в больших концентрациях может представлять риск для здоровья, связанный с радиационным облучением. Концентрация излучения от радона меняется от 0.1 Бк/м³ в Антарктиде, на океанском побережье она достигает 1 Бк/м³, на открытом воздухе вдали от океана 10-30 Бк/м³, в помещениях типично наблюдается уровень от 100 до 400 Бк/м³, в урановых шахтах уровень радона создаёт концентрацию альфа-излучения порядка 10 кБк/м³ и выше. Считается опасным длительное пребывание в помещениях с концентрацией радона, приводящей к активности более 1000 Бк/м³, действующие в странах Евросоюза нормативы признают допустимыми уровень 400 Бк/м³ в старых зданиях и 200 Бк/м³ в новых, нормативы США

рекомендуют принимать меры при уровне радона выше 150 Бк/м³ и призывают стремиться к уровню 80 Бк/м³. Аналогичные нормативы действуют в России. Радон отвечает за примерно половину дозы радиоактивного излучения, получаемого человеком.



Большие концентрации радона приводят к увеличению риска возникновения рака лёгких. Исторически на некоторых курортах (в России, Беларуси, Тайланде, Германии, Австрии, США) практикуется радоноterapia — приём минеральных вод обогащённых радоном, либо вдыхание воздуха с большой концентрацией радона. Метод не имеет общепризнанной доказанной клинической эффективности, при применении необходимо сопоставлять с риском развития раковых заболеваний.

Интересным примером реакции спонтанного деления в природе является обнаружение в урановых месторождениях Окло (Габон) следов работы природного ядерного реактора (рисунок 73) [79][80]. При исследовании изотопного состава руд Окло обнаружилась нехватка изотопа урана-235 и избыток неодима-143 и рутения-99. Эти изменения характерны для переработки урана-235 в ядерном реакторе.

Рисунок 72: Цепочка распада урана (радиевая цепочка). С сайта [78].



Рисунок 73: Слева: фотография остатков одного из природных реакторов в Окло (реактор 15). Жёлтые горные породы содержат оксид урана. С сайта [79]. Справа: схема расположения природных реакторов в Окло. (1) — зоны реакторов, (2) — песчаник, (3) — слой урановой руды, (4) — гранит. С сайта [80].

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» [81].

Радиоуглеродный анализ.

Радиоуглеродный метод датировки был разработан американским учёным Виллардом Либби в конце 40-х годов двадцатого века [82]. За это открытие В.Либби был удостоен Нобелевской премии по химии 1960 года.

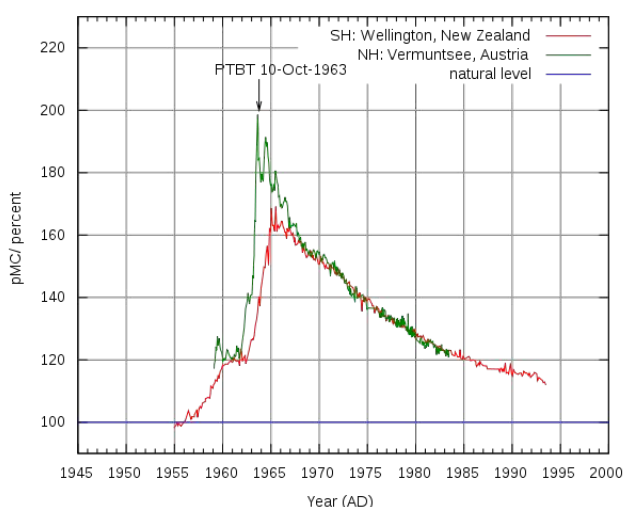


Рисунок 75: Масс-спектрометр, используемый для радиоуглеродного анализа. С сайта [82].

Рисунок 74: 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 [82].

В основе метода лежат следующие физические соображения.

1. У углерода есть три природных изотопа¹: 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: ${}^1_0n + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$.

¹ 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. 81).

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

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 74). 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 перемещивается 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 [81], [83], [84]. 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 76). 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.

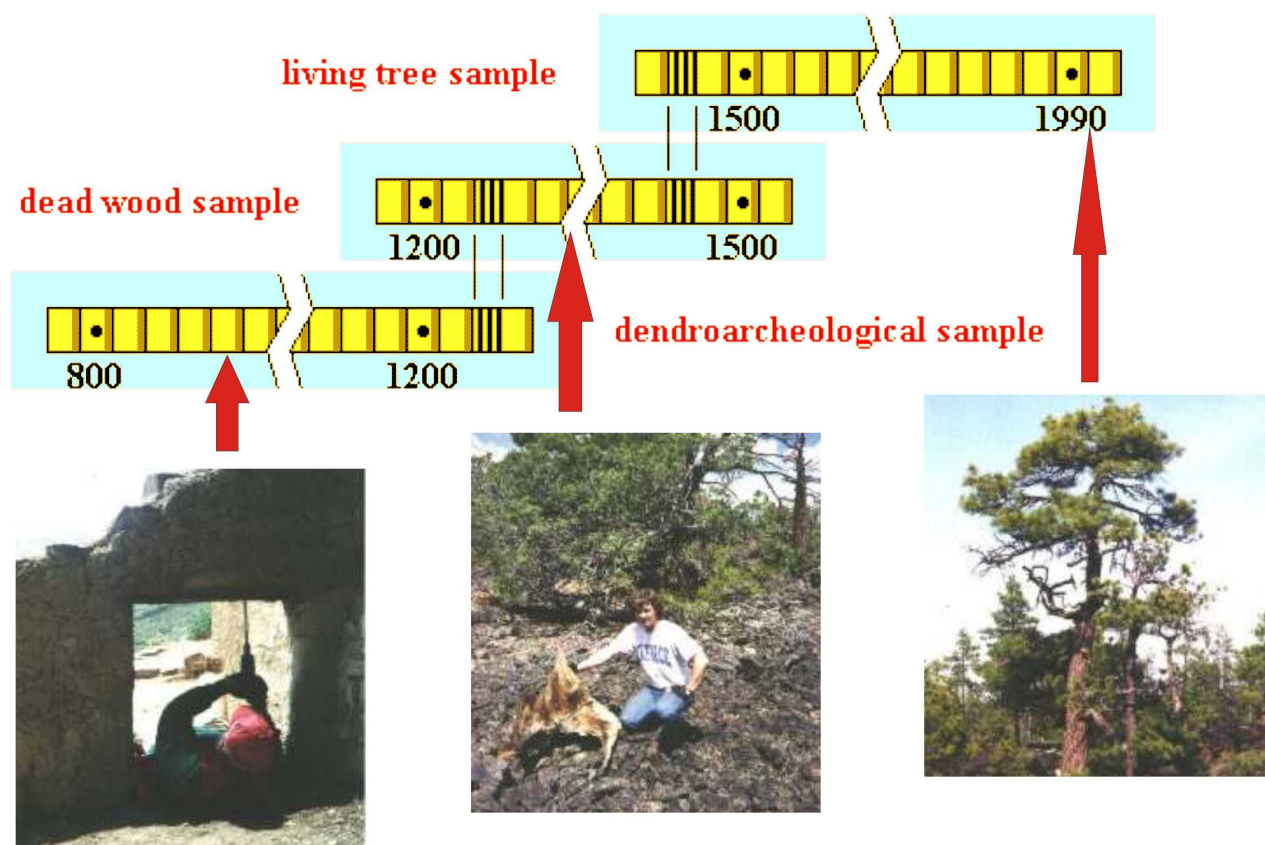


Рисунок 76: Принцип построения дендрохронологической шкалы времени. Сверху: схема годовых колец в трёх образцах живого дерева, найденного при раскопках фрагмента дерева и извлечённого из древней постройки фрагмента. С сайта [84].

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 75).

Одним из известных примеров применения этого метода является проведённая в 1988 году датировка Туринской плащаницы [81], [85], 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 физический 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 [81], на странице Геологического факультета МГУ (курс лекций Ю.А.Костицына) [86] и в других источниках [87].

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)¹. 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 тория 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 «Кьюриозити» для оценки возраста минералов на поверхности Марса [88]. Датировка показала возраст породы от 3.86 до 4.56 млрд. лет.

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

¹ 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.

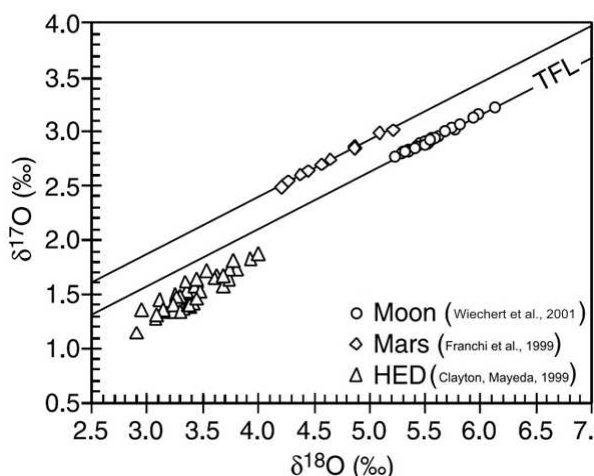


Рисунок 77: Содержание изотопов кислорода в метеоритах разного происхождения. Кружки — лунные метеориты, ромбы — метеориты марсианского происхождения, треугольники — метеориты класса HED, предположительно осколки астероида Веста. Из лекций [86], по работе Wiechert et al., Science v.294 p.345

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 77). Этот эффект наиболее силён для лёгких элементов, где массы изотопов заметно различаются.

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 78).

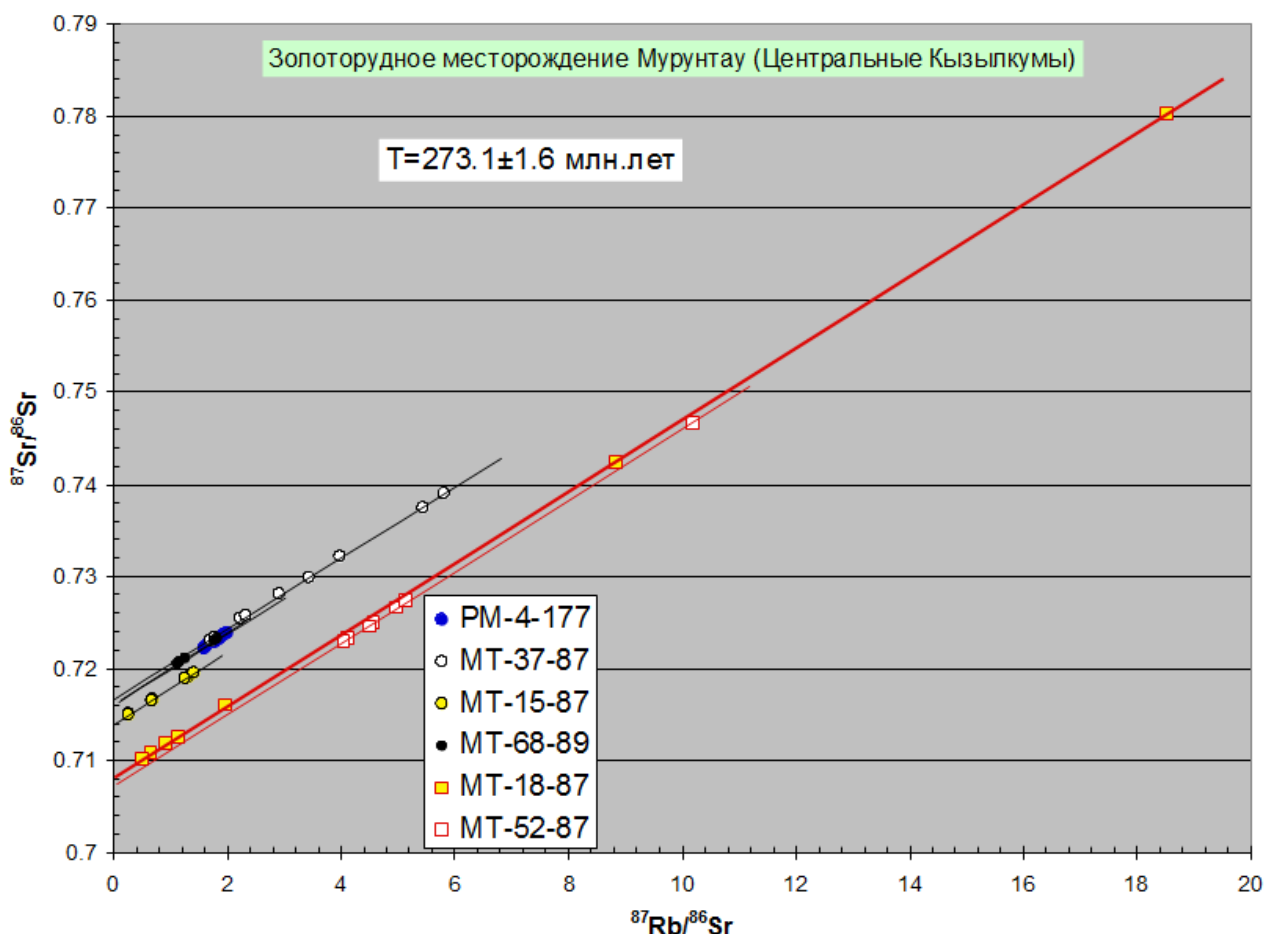


Рисунок 78: Изотопный анализ (Rb-Sr) проб золоторудного месторождения Мурунтау. Определённый возраст 273.1 млн.лет. Точки полученные на разных сериях образцов ложатся на семейство параллельных прямых с одним наклоном. Из лекций Ю.А.Костицына [86].

Изотопная датировка является одним из главных источников нашего знания о возрасте Земли, Луны и Солнечной системы. Данные полученные различными методами (рисунки 79, 80, 81) указывают, на то что самые древние горные породы формировались на Земле около 4 млрд. лет назад [90], [89].

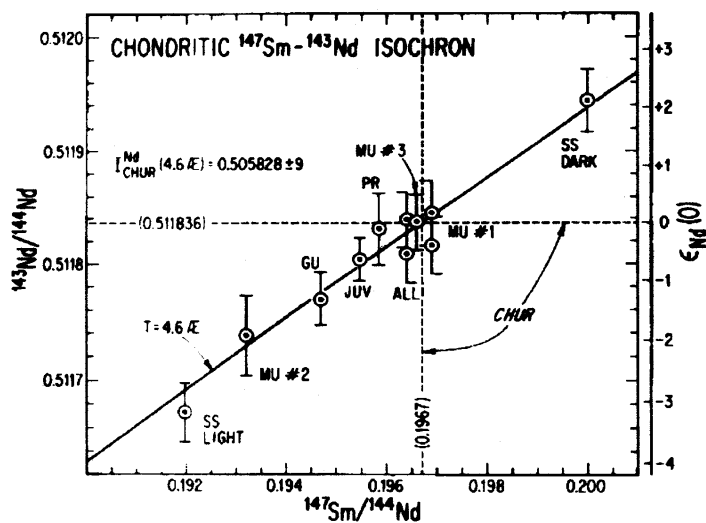
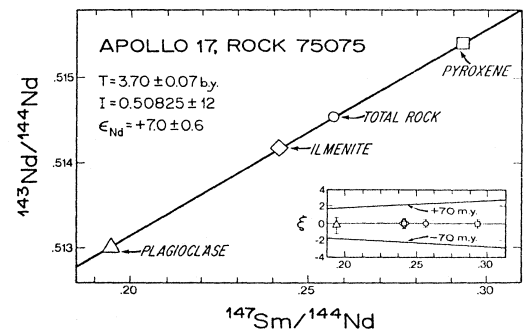


Рисунок 79: Изотопный анализ (Sm-Nd) возраста метеоритов-хондритов. Прямая соответствует возрасту 4.6 млрд.лет. Из работы [90].



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

Рисунок 80: Изотопная датировка (Sm-Nd) лунных пород, доставленных экспедицией "Апполон-17". Из лекций Ю.А.Костицына [86].

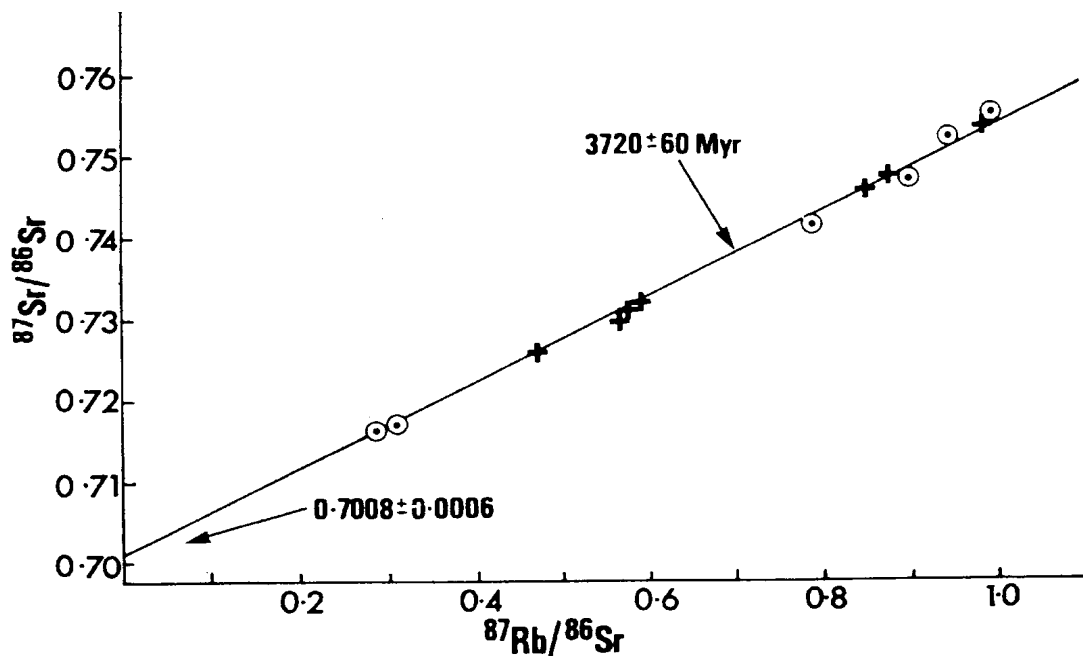


Рисунок 81: Изотопная датировка (Sr-Rb) гнейсов (древних горных пород) Гренландии. Из работы [89].

Военные применения: атомная и водородная бомбы.

Огромное выделение энергии при реакциях деления и синтеза, превышающее энергию химической реакции (в расчёте на атом) в 10^6 – 10^7 раз, нашло своё применение в военной технике — в создании атомной и водородной бомб [91], [92].

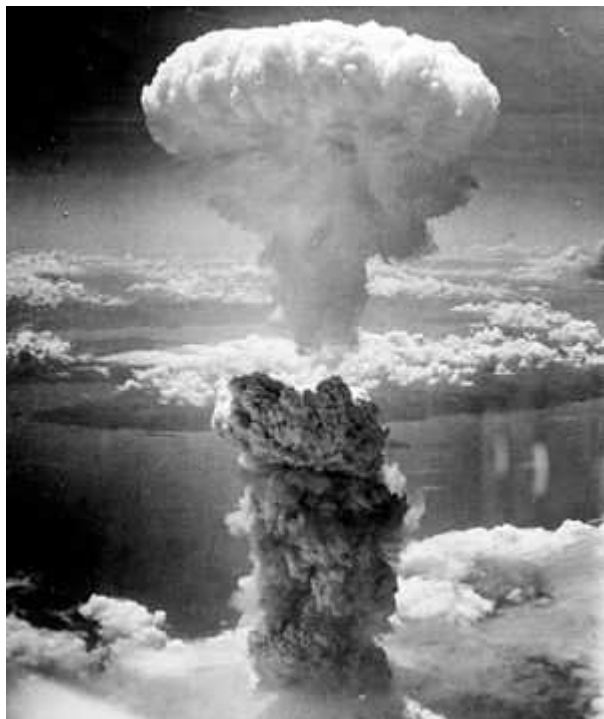


Рисунок 82: Облако взрыва от бомбы, взорванной в Нагасаки 9 августа 1945 года. С сайта [91].



Рисунок 83: Кратер образовавшийся при неглубоком подземном взрыве в Неваде (США) (также известен как "кратер Седан"). В 1962 году при взрыве на небольшой глубине термоядерного боеприпаса мощностью 104 кт тротилового эквивалента. При взрыве образовался кратер 100 метров в глубину и 390 метров в диаметре. С сайта [92].

Эта тема достаточно хорошо освещена в доступной и широко известной литературе. В создании атомной бомбы в США и Советском Союзе участвовали самые выдающиеся физики того времени: Эйнштейн, Ферми, Ландау и многие другие. Параллельно развивались практически детективные истории, связанные с ядерным проектом Германии, получением советской разведкой информации об американском атомном проекте. Начало атомной эры ознаменовалось трагедией японских городов Хиросимы и Нагасаки, подвергнутых атомной бомбардировке. Осветим коротко некоторые вопросы, касающиеся физических принципов, лежащих в основе атомного оружия.

Принцип «работы» атомной бомбы заключается в создании критической массы делящегося вещества (урана-235, плутония-239, урана-233). Требуется большая степень очистки от изотопа урана-238 (составляющего 99.3% природного), так как он поглощает нейтроны, распадаясь далее по другим каналам. Поэтому для запуска самоподдерживающейся взрывной цепной реакции необходимо содержание урана-235 не менее 80%. Типичная масса ядерного заряда составляет килограммы очищенного урана, плутония или их смеси. Для шара из чистого плутония-239 критическая масса составляет около 11 кг, то есть этот шар имеет диаметр около 10 см. С применением отражателей, уменьшающих потерю нейтронов, критическую массу можно уменьшить примерно вдвое. С учётом разницы в выделении энергии, 10 килограммов «ядерной взрывчатки» соответствует десяткам и сотням килотонн обычного взрывчатого вещества (обычно сравнивают с тротилом (ТНТ, тринитротолуол) и говорят о тротиловом эквиваленте ядерного боеприпаса). Мощность бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки составляла около 20 килотонн тротилового эквивалента каждая.

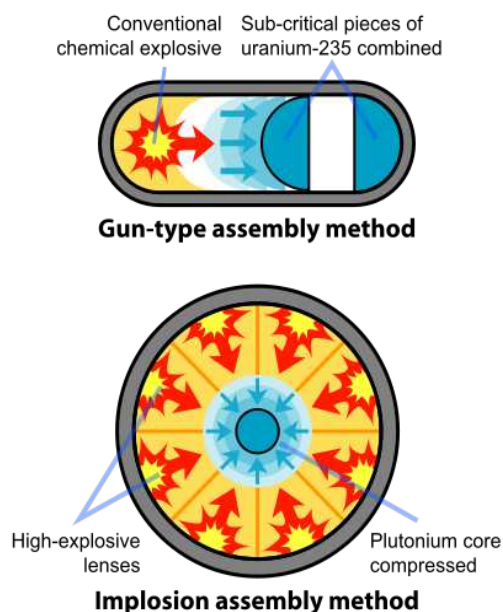


Рисунок 84: Основные схемы достижения критической массы. На верхнем рисунке: выстреливание субкритических масс делящегося вещества друг в друга. На нижнем рисунке: сжатие плутония взрывом. С сайта [91].

В водородной или термоядерной бомбе основным источником энергии является реакция ядерного синтеза. В современных схемах топливом для термоядерной реакции является дейтерид лития-6. Для достижения условий запуска реакции синтеза (большие температуры и плотности) используется небольшой атомный заряд размещённый рядом. При подрыве ядерного заряда возникает поток нейтронов, вызывающий распад лития-6 ${}^1_0n + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$, а образующийся тритий вступает в реакцию синтеза с дейтерием. Мощность взрыва водородной бомбы составляет единицы и десятки мегатонн тротилового эквивалента.

Страны, официально обладающие ядерным оружием, составляют так называемый «Ядерный клуб» (цифры показывают дату первого испытания):

1. США (атомное, 1945; водородное, 1951)
2. СССР и Российская Федерация (атомное, 1949; водородное, 1953)
3. Великобритания (атомное, 1952; водородное, 1957)
4. Франция (атомное, 1960; водородное, 1968)
5. Китай (атомное, 1964; водородное, 1967)
6. Индия (атомное, 1974; водородное, 1998)
7. Пакистан (атомное, 1998)

Кроме этого, Израиль по некоторым сведениям обладает ядерным оружием, но официально его наличие не признаёт; КНДР объявила о проведении ядерных испытаний в 2006 и 2009 году, но достоверность этих заявлений иногда подвергается сомнению; ЮАР самостоятельно разработала свою ядерную программу, но уничтожила имеющиеся ядерные заряды в 1990-х.

Атомная энергетика.

История.

Первый в мире ядерный реактор, «Чикагская поленница» («Chicago Pile-1», CP-1) был построен под руководством Э.Ферми в 1942 году на стадионе Университета Чикаго. Это была сборка из графитовых и урановых блоков (около 350 тонн графита, около 30 тонн природных оксидов урана и около 5 тонн металлического природного урана). Реактор был запущен в декабре 1942 года, на нём было поставлено несколько опытов, показавших возможность проведения самоподдерживающейся цепной реакции и управления ей. Тепловая пиковая мощность реактора составляла около 200 Вт, в большинстве опытов — менее 1 Вт (реактор не имел охлаждения). В феврале 1943 года реактор был разобран [93], [94].



Рисунок 86: Строительство "Чикагской поленницы", рисунок художника. С сайта [93].

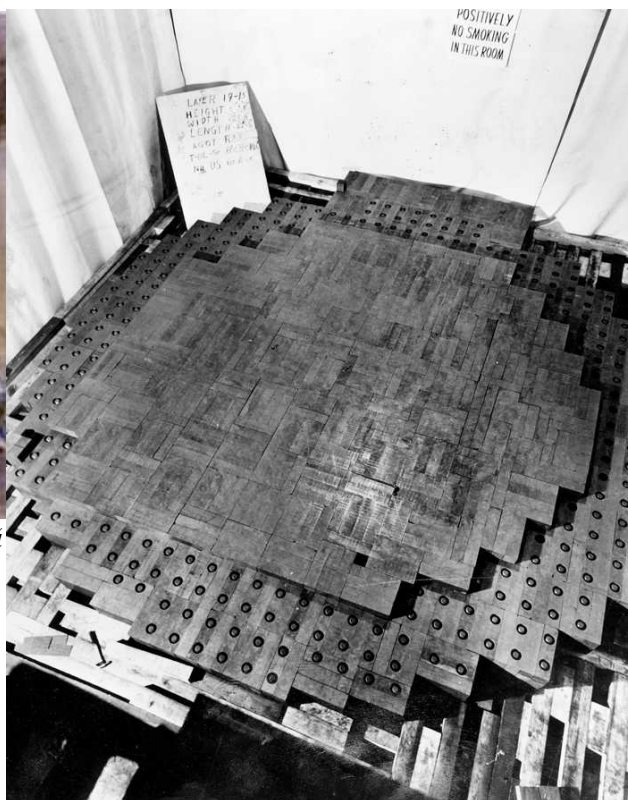


Рисунок 85: Укладка очередного слоя "Чикагской поленницы". Слой 19 (верхний) из графита, слой 18 (частично виден) содержит уран и оксид урана. С сайта [94].

Сведения по истории отечественной атомной отрасли в компактном виде изложены на сайте «Росатома» [95]. Отметим здесь же цикл небольших брошюр с популярным изложением вопросов связанных с атомной энергетикой, подготовленных Общественным советом Госкорпорации «Росатом» [96], [97], [98], [99], [49], [50].

Первый в СССР ядерный реактор Ф-1 был построен в «Лаборатории №2 АН СССР», из которой позднее вырос Курчатовский институт, в Москве под руководством И.В.Курчатова. По конструкции он был аналогичен «Чикагской поленнице», также использовал природный уран и графитовый замедлитель.

Первая в мире атомная электростанция была построена в Обнинске, станция дала ток в 1954 году. Топливом являлся обогащённый по изотопу уран-235 уран, теплоносителем являлась вода. Генерируемая мощность составляла 5МВт. Выделяемая энергия деления ядер

забиралась водой, проходящей через активную зону реактора. Этот, первичный, контур отдавал тепло в теплообменниках воде второго контура, которая превращалась в пар, идущий на парогенератор (рисунок 87, 88). Обнинская АЭС проработала почти 50 лет и была остановлена в 2002 году [96].

В настоящее время в мире действует около 400 энергетических реакторов, доля «атомной» электроэнергии в энергетическом балансе развитых стран измеряется десятками процентов (рисунок 89) [100]. Мощность (тепловая) современных энергетических реакторов достигает 5ГВт. Для сравнения, мощность Саяно-Шушенской ГЭС составляла (до аварии) 6.4ГВт.

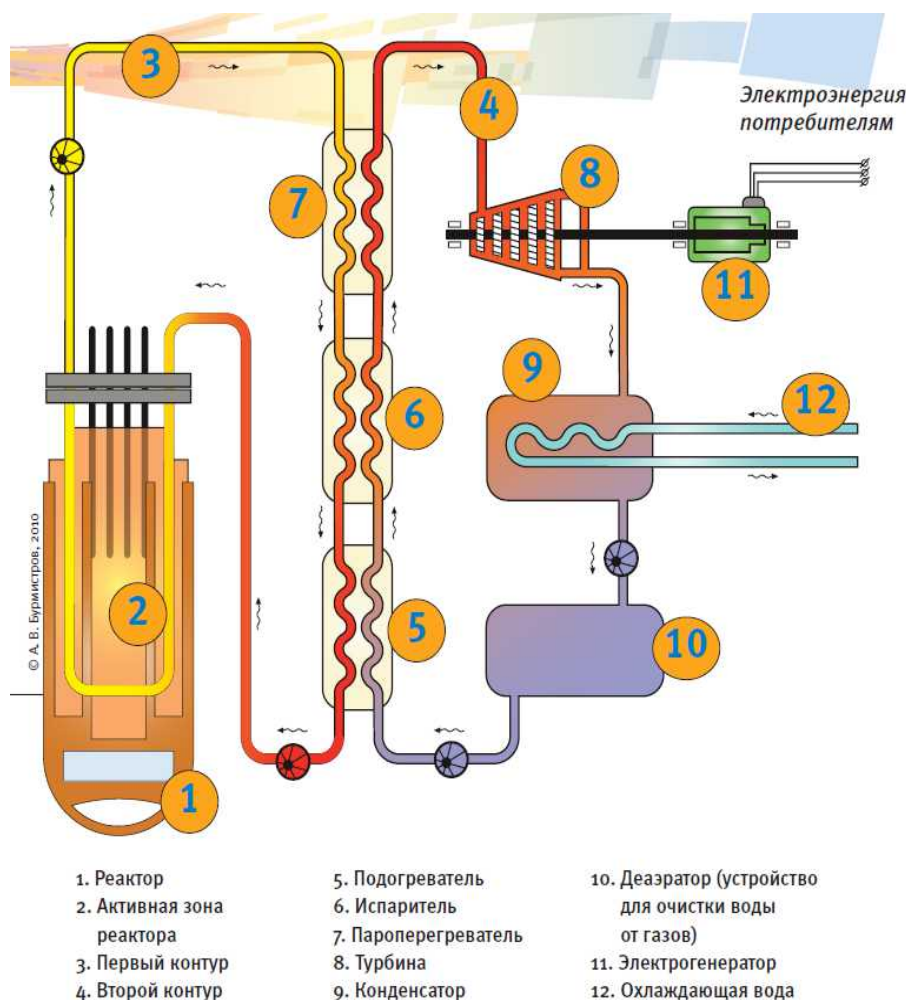


Рисунок 87: Схема работы реактора Обнинской АЭС. Из брошюры [96]



Рисунок 88: Реакторный зал Обнинской АЭС. Из брошюры [96]

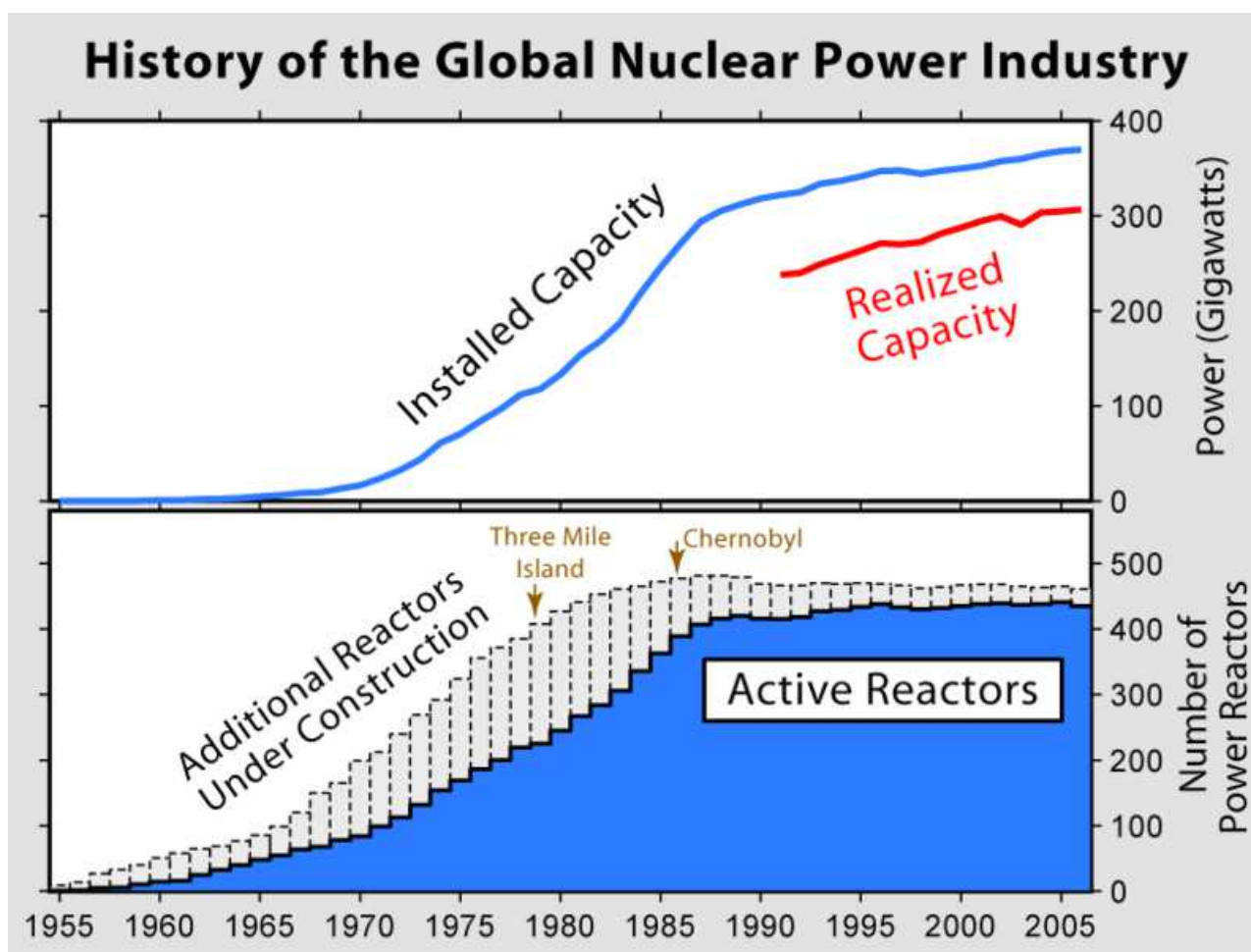


Рисунок 89: Количество энергетических ядерных реакторов в мире. С сайта [100].

Принципы работы атомной энергетики.

В основе мирной атомной энергетики также лежит цепная реакция деления, проходящая в равновесном режиме, когда количество образующихся нейтронов не увеличивается со временем и точно соответствует числу полному нейтронов, необходимых для деления, поглощаемых без деления и вылетающих из активной зоны реактора. Для поддержания точного равновесия в реактор вводятся элементы управления — обычно это поглощающие стержни (например, кадмиевые), при их введении в активную зону часть нейтронов поглощается и цепная реакция начинает затухать. Для реакции деления нужны медленные нейтроны (они эффективнее вызывают деление ядер). Поэтому в реакторе между активными элементами (топливными сборками, тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ) размещают замедлитель: вещество не поглощающее нейтроны, при столкновении с атомами которого нейтроны образовавшиеся при делении эффективно теряют энергию. Напомним, что при делении ядра образуются нейтроны с энергией порядка сотни мегаэлектронвольт. После многих столкновений с веществом замедлителя «газ нейтронов» приобретает температуру, соответствующую температуре замедлителя¹ - это соответствует энергии нейтронов в несколько десятых электронвольта (энергия 1 эВ соответствует по шкале температур температуре 11600K), то есть в миллион раз меньше начальной. По законам механики наиболее эффективно энергия теряется при соударении с телом той же массы, поэтому в качестве замедлителя выгодно использовать вещество с лёгкими атомами. Наиболее часто в качестве замедлителя используется тяжёлая (дейтериевая) вода и графит. В

¹ Это общее требование термодинамики — при приведении двух систем в тепловой контакт в равновесии температуры систем выравниваются.

исследовательских реакторах с водным замедлителем активную зону реактора можно видеть непосредственно (рисунок 90) [101].



Рисунок 90: Вид на активную зону реактора МИФИ ИРТ-2000. Голубое свечение вызвано черенковским излучением частиц, движущихся со скоростью больше скорости света в воде. С сайта [101].

Задача регулирования атомного реактора кажется неразрешимой, так как при цепной реакции нейтроны возникают очень быстро — как мы знаем, в атомной бомбе цепная реакция приводит ко взрыву. Принципиально важными для возможности управления реакцией и контролируемого поддержания реакции на критическом уровне являются запаздывающие нейтроны, образующиеся при дальнейших распадах продуктов деления. Более 99% процентов нейтронов образуются при делении (так называемые мгновенные нейтроны, характерное время жизни для мгновенных нейтронов порядка $10^{-7} \dots 10^{-4}$ секунды для быстрых и медленных нейтронов, соответственно), менее одного процента запаздывающих нейтронов возникает в процессе бета-распада перегруженных нейтронами осколков с характерными временами распада от долей секунды до десятков секунд. Таким образом, оказывается технически возможным подобрать такие условия, чтобы по образованию мгновенных нейтронов реактор находился в субкритическом режиме, а с учётом запаздывающих нейтронов — в надкритической. Тогда изменение скорости реакции оказывается проходящим не на масштабе времён распада, а на масштабе времён образования запаздывающих нейтронов (секунды и десятки секунд), и техника может контролировать ход реакции, поддерживая её в стационарном критическом режиме.

Выделяемая при делении энергия отбирается теплоносителем и далее, как правило, превращается в электроэнергию в паровых турбогенераторах. Из соображений радиационной безопасности обычно делается два контура теплообмена: первичный охлаждает активную зону, вторичный отбирает тепло у теплоносителя из первичного контура и передаёт его потребителям (в том числе парогенераторам), находящимся в «радиационно-чистой» зоне (рисунок 87).

Отметим, что с физическими принципами производства энергии на атомной электростанции (АЭС) связаны следующие ограничения:

1. У АЭС нет гибкости в генерируемой мощности, режим работы реактора довольно жёстко задан требованием поддержания реакции в критическом режиме.
2. Ввод и вывод АЭС из рабочего режима является длительным технологическим процессом. Распад и накопление различных изотопов могут менять характеристики поглощения нейтронов в реакторе (эффект йодной или ксеноновой ямы), необходимость ожидания распада короткоживущих изотопов при остановке реактора обуславливает заметные времена «остывания» реактора, даже при остановке цепной реакции.
3. Так как среди продуктов деления могут присутствовать и долгоживущие радиоактивные изотопы, хранение и утилизация отработанного ядерного топлива является важной технологической задачей.
4. Так как выработка электроэнергии производится на тепловых машинах

(парогенераторах), то максимальный КПД ограничивается КПД цикла Карно. Поэтому рядом с АЭС большой мощности необходимо иметь достаточно большой охлаждающий водоём для использования в качестве холодильника тепловой машины. Выделение в нём тепла является одним из главных факторов воздействия штатно работающей АЭС на экологическую ситуацию.

Виды ядерных реакторов.

Приведём вкратце классификацию реакторов, чтобы составить представление об их разнообразии и степени развития отрасли. Список реакторов по странам (неполный, но достаточно обширный) приведён на сайте [102]. Приводимая классификация не строгая, возможны случаи, когда реактор одновременно попадает в несколько категорий.

По назначению выделяют:

- Энергетические реакторы. Предназначены для производства энергии (электроэнергии, тепла, опреснения воды итд.) в промышленном масштабе. Характерные мощности меняются от ~10 МВт в первых реакторах до 500 МВт-5ГВт в современных.



Рисунок 91: Смоленская АЭС. Из брошюры [97].

- Транспортные реакторы. По сути своей — это также энергетические реакторы, предназначенные для обеспечения энергией кораблей [103], [104] и подводных лодок [105], [106] (рисунки 92, 93). Принцип работы похож на принцип работы «стационарного» реактора. Паровые турбины могут использоваться либо непосредственно для вращения гребных винтов, либо для вращения электрогенераторов, обеспечивающих энергией электродвигатели. Необходимость более компактного дизайна и условия эксплуатации (вибрации, качка, ограничение по размеру защиты) приводят к несколько меньшей мощности корабельных реакторов, обычно это десятки-сотня мегаватт. Из-за сложностей политического характера и вопросов ядерной безопасности в основном ядерными реакторами оборудуются военные корабли, для которых автономность и энерговооружённость имеет приоритет по сравнению с экономической эффективностью. Первая подводная лодка с ядерной силовой установкой - «Наутилус» (США) вышла в море в 1955 году, первая советская

АПЛ «Ленинский комсомол» в 1958. Также атомную силовую установку ставили на авианосцы (на 2012 год в США имелось 11 авианосцев с атомной силовой установкой), в ВМФ РФ помимо АПЛ в настоящее время в строю тяжёлый атомный ракетный крейсер «Пётр Великий» (силовая установка состоит из двух реакторов общей мощностью 600 МВт). Список гражданских судов с ядерной силовой установкой гораздо короче. Первым судном с атомной силовой установкой, предназначенным для гражданской службы, был советский атомный ледокол «Ленин» (рисунок 92). Он проработал в Арктике с 1959 по 1989 год, изначально ледокол был оборудован тремя 90 МВт реакторами, после переоборудования было установлено два реактора по 171 МВт, сейчас корабль сохраняется как корабль-музей [107]. Всего в Советском Союзе и России было построено 9 атомных ледоколов, в строю на 2012 год было 6: «Россия», «Таймыр», «Советский Союз», «Вайгач», «Ямал» и «50 лет Победы». В других странах атомных ледоколов не строилось. Кроме этого, в разных странах было построено 4 судна с ядерной силовой установкой, предназначенных для перевозки грузов: грузопассажирский «Саванна» (США, 1962-1972, один 74 МВт реактор, сейчас музей), грузопассажирский «Отто Ган» (ФРГ, 1968-1979, один 38 МВт реактор, демонтированный в 1979), торговый «Муцу» (Япония, 1970-1992, коммерчески не эксплуатировался из-за постоянных проблем с силовой установкой, один 36 МВт реактор) и ледокольный лихтеровоз «Севмормуть» (СССР, 1988-2007 (временно выведен из эксплуатации), один 135 МВт реактор).



Рисунок 92: Атомный ледокол "Ленин". Из брошюры [98].



Рисунок 93: АПЛ проекта 941 "Акула" (в западной классификации "Тайфун"). С сайта [106].

- Исследовательские (научные) реакторы. Это как правило небольшие реакторы, используемые для получения гамма-излучения или потока нейтронов для использования в научных исследованиях в физике, химии, биологии, для испытания свойств материалов, производства изотопов. В России такие реакторы есть, например, в Дубне (ОИЯИ), Гатчине (ПИЯФ). Среди международных центров можно отметить Гренобль во Франции (ИЛЛ, Институт Лауэ-Ланжевена) [108], [109], Оак Ридж в США. Энергетический выход этих реакторов невелик: тепловая мощность реактора в Институте Лауэ-Ланжевена в Гренобле около 58 МВт (для сравнения, тепловая мощность энергетического реактора РБМК-1000 около 3 ГВт), при этом температура активной зоны поддерживается равной всего 35 °С. Более важной характеристикой этих реакторов является, например, плотность излучения, которое можно использовать в исследованиях. Так, реактор ИЛЛ (рисунки 94, 95) обеспечивает поток нейтронов, равный $1.5 \cdot 10^{15}$ нейтронов на см^2 в секунду.



Рисунок 94: Институт Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция). Исследовательский реактор находится под куполом в центре фото. С сайта [108].



Рисунок 95: Реакторный зал Института Лауэ-Ланжевена. Реактор в центре, вокруг расположено экспериментальное оборудование. С сайта [108].

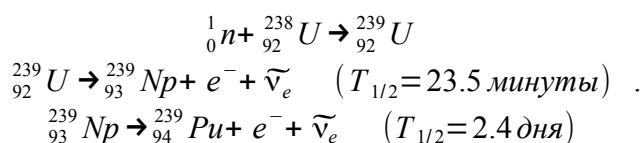
- Оружейные (изотопные) реакторы. Эти реакторы в основном направлены на производство изотопов, необходимых для получения материалов для ядерного оружия. В частности, сюда относятся реакторы на быстрых нейтронах, перерабатывающие уран-238 в плутоний-239.

По скоростям нейтронов, необходимых для прохождения цепной реакции, реакторы разделяют на следующие типы:

- Реакторы на медленных («тепловых») нейтронах. Это классическая схема энергетического реактора. При делении ядра выделяется энергия в 100-200 МэВ, в основном уносимая 2-3 нейтронами. Таким образом, типичная энергия нейтрона после деления составляет несколько десятков МэВ. Эффективность захвата ядром нейтрона зависит от энергии нейтрона. Оказалось, что деление урана-235 гораздо эффективнее происходит медленными нейтронами. В то же время, сечение захвата нейтрона ураном-238 слабее зависит от энергии нейтрона и остаётся малым.¹ Поэтому при использовании медленных нейтронов оказывается возможным запустить самоподдерживающуюся цепную реакцию на слабообогащённом уране или даже на природном уране. Для того, чтобы затормозить энергичные нейтроны в реактор помещается замедлитель, обычно графит или тяжёлая вода. Сталкиваясь с ядрами углерода или дейтерия нейтрон отдаёт им свою энергию, в предельном случае «охлаждаясь» до энергии, соответствующей температуре активной зоны. Топливом при этом является только уран-235, составляющий менее 1% от природного урана.

¹ Вероятность индуцированной облучением ядерной реакции характеризуют так называемым сечением реакции σ : вероятность прохождения реакции в единицу времени равна произведению сечения реакции на поток облучающих частиц (число частиц в секунду через единичную площадь). Сечение ядерной реакции измеряется в внесистемных единицах барн, $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$. Для нас при обсуждении на качественном уровне важна прямая пропорциональность между вероятностью и сечением. В природном уране содержится 99.3% ^{238}U и 0.7% ^{235}U . При облучении тепловыми нейтронами сечение захвата без деления для урана 235 равно 99 барн, сечение захвата теплового нейтрона с делением 585 барн, а сечение захвата без деления ураном 238 равно всего 2.7 барн (сечение деления тепловыми нейтронами для ^{238}U очень мало и равно $1.7 \cdot 10^{-5}$ барн) [110]. Таким образом, пренебрегая другими потерями, в природном уране медленный нейтрон с вероятностью 55% вызовет деление урана 235, с вероятностью 36% будет захвачен ураном 238 и с вероятностью 9% будет захвачен без деления ураном 235. Так как при каждом делении выделяется 2-3 нейтрона, это позволяет, в принципе, поддерживать цепную реакцию на природной смеси изотопов. Топливо для АЭС обогащают до примерно 5% содержания урана-235.

- Реакторы на быстрых нейтронах (реакторы-размножители). В этих реакторах не используется (или почти не используется) замедлитель, так что цепную реакцию деления вызывают быстрые (незамедленные) нейтроны [99]. В частности, это означает что в первичном контуре теплоносителем является не вода, а более тяжёлые металлы (ртуть или натрий) либо поток газообразного гелия. Сечение захвата быстрых нейтронов (с энергиями в МэВ и выше) меньше, чем сечение захвата медленных нейтронов. Однако есть несколько преимуществ этого типа реакции. Захваченный быстрый нейтрон вносит дополнительный избыток энергии в ядро, что приводит к образованию большего числа вторичных нейтронов. Большая плотность потока нейтронов в активной зоне позволяет использовать часть нейтронов не для деления, а для переработки изотопов. В частности, для получения ядерного топлива. Для этого активная зона реактора окружается ураном-238 (наиболее распространённый в природе, но не способный к делению, изотоп урана). Захват нейтрона ураном-238 приводит к образованию нестабильного урана-239, который через цепочку бета-распадов превращается в плутоний-239:



Что немаловажно, плутоний в дальнейшем может быть отделён чисто химическими способами. Дополнительной политической сложностью в этом типе реакторов является то, что нарабатываемый плутоний-239 является основным компонентом ядерного оружия, и поэтому возникает необходимость более строгого обеспечения безопасности и контроля.

Кроме этого реакторы классифицируют по виду и размещению топлива, по виду теплоносителя и замедлителя, структуре корпуса и другим инженерным признакам.

Экология и экономика ядерной энергетики: плюсы и минусы.

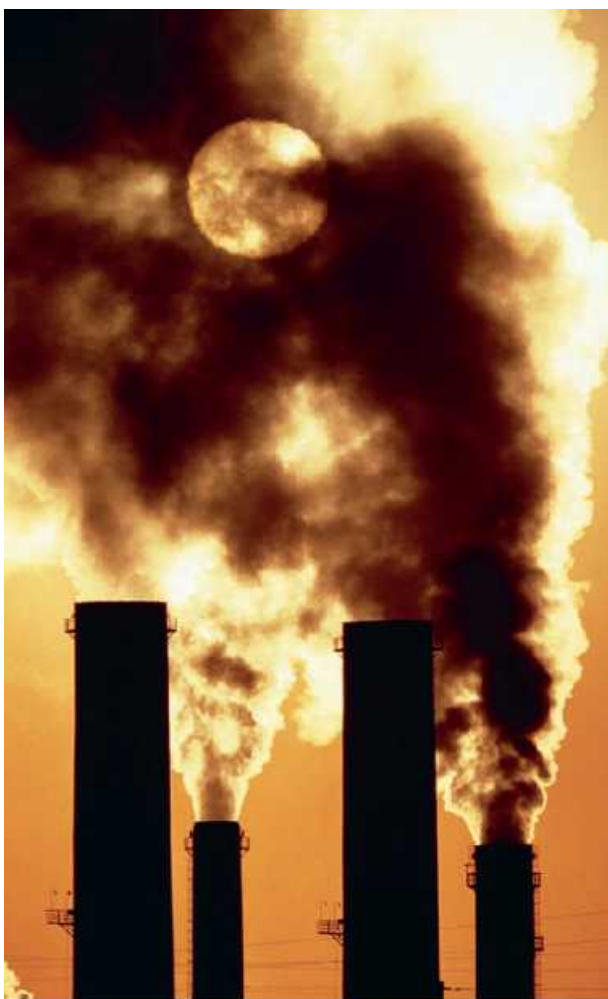


Рисунок 96: Трубы ТЭС. Из брошюры [97]



Рисунок 97: Градирни Нововоронежской АЭС. Из брошюры [97]

С ядерной энергетикой, как и с любой отраслью промышленности связаны определённые риски. Эти риски во многом демонизированы прессой и «экологическими экстремистами». Выбор между «за» и «против» требует подробного анализа экологических и экономических факторов и не имеет однозначного ответа. Часть вопросов освещена в брошюрах [49], [50].

Отметим вкратце плюсы ядерной энергетики и специфичные для нее риски.

К плюсам стоит отнести:

1. Компактность АЭС. Например, Ленинградская АЭС с номинальной мощностью 4 ГВт занимает площадь 454 га. Для сравнения, Саяно-Шушенская ГЭС имеет площадь зеркала водохранилища 620 км² (62000га) при установочной мощности 6.4 ГВт. Таким образом, по сравнению с ГЭС, АЭС не требует выделения больших площадей.
2. Отсутствие выбросов. В штатном режиме АЭС выделяет только тепло в водоём теплосброса. ТЭС постоянно выбрасывают продукты сгорания, как в виде дымовых фракций, так и в виде золы и шлака. Необходимость постоянного снабжения ТЭС, постоянные выбросы наносят вред окружающей среде (в частности, усиливая «парниковый эффект»). Более того, при сжигании угля в отвалах ТЭС накапливается много содержащихся в угле естественных изотопов с природной радиоактивностью — в некоторых случаях шлак в отвалах ТЭС больше добавляет к радиационному фону, чем АЭС.

К технологическим минусам относятся:

1. Негибкость режима АЭС. Так как реактор работает в фиксированном режиме, выдаваемая АЭС мощность может изменяться лишь в незначительных пределах.
2. Длительные сроки вывода из эксплуатации и деактивации как самой АЭС, так и ядерного топлива.

Экологическими рисками, специфичными для ядерной энергетики, являются:

1. Риск аварии с выбросом радиоактивных изотопов (Три-Майл-Айленд (1979), Чернобыль (1986), Фукусима (2011)). Подчеркнём, что этот риск штатный и он может быть минимизирован адекватными мерами безопасности при конструировании и эксплуатации. Также отметим, что крупнейшей техногенной катастрофой считается неядерная авария на химическом заводе в Бхопале (Индия), в которой непосредственно погибли 3000 человек и около 15000 умерли от последствий этой аварии [111]. Для сравнения, по результатам Чернобыльской аварии зарегистрировано 134 случая острой лучевой болезни, около 50 смертей могут быть отнесены непосредственно к воздействию радиации, и в общем итоге ВОЗ оценивает количество тех, кто умрёт от последствий аварии в 4000 человек [112].
2. Необходимость захоронения отработанного топлива и элементов активной зоны на длительный срок, до распада долгоживущих изотопов. Это штатная проблема, которая разрешима ввиду сравнительно небольшого объёма отходов. Однако её разрешение требует долговременных усилий и должно учитываться в общем экономическом балансе ядерной отрасли.

При рассмотрении экологических проблем ядерной энергетики следует осознавать большой «психологический» накал этой проблемы — боязнь малоизученного влияния радиации на человека порождает фаталистические мифы об абсолютном вреде атомной энергетики. Человек часто предпочитает известный риск менее известному, хотя, например, проживание вблизи ТЭС может наносить постоянный вред здоровью, а риск пострадать в автомобильной аварии существенно выше риска пострадать от аварии на АЭС.

Рассмотрим вкратце три наиболее известные аварии на гражданских АЭС:

Авария на Три-Майл-Айленд (США).



Рисунок 98: АЭС Три-Майл-Айленд. Второй энергоблок (на котором произошла авария) - справа. Фото сделано до аварии. С сайта [113].

АЭС Три-Майл-Айленд (Three Miles Island) находится в штате Пенсильвания в США. На станции было установлено два энергоблока мощностью 802 и 906 МВт, введенных в эксплуатацию в 1974 году. Реакторы имели традиционную двухконтурную водно-водяную схему (рисунок 98).

28 марта 1978 года в 4 часа утра на втором энергоблоке произошёл отказ насосов во втором (нерадиоактивном) контуре [113]. Автоматика отключила подачу воды первого контура в парогенератор. При этом вода, охлаждающая активную зону должна была циркулировать по аварийному контуру, но оказалось, что после планового ремонта остались закрытыми заслонки

аварийных трубопроводов. Датчики состояния заслонок на пульте оказались закрыты

табличкой о том, что идёт ремонт, поэтому некоторое время операторы АЭС не понимали их состояние. Давление в первом контуре начало расти и автоматический клапан сбросил давление и часть теплоносителя первого контура. Однако после сброса он закрылся не полностью, и утечка воды из первого контура продолжалась. Здесь операторы совершили ряд ошибок, не осознав наличие утечки (трубопровод можно было перекрыть заслонкой) и не скомпенсировав утечку воды. Потеря давления в первичном контуре ниже критической точки привела к образованию пара (напомним, что при высоких давлениях фазовая граница между паром и жидкостью пропадает), паровая пробка заблокировала трубопроводы первого контура и активная зона начала неконтролируемо разогреваться.

К 6:20, по последующим расчётам, температура активной зоны достигла 2200⁰С и циркониевые оболочки ТВЭЛов начали разрушаться. При реакции циркония оболочек с паром образовался водород. Уран-циркониевая смесь расплавилась и частично стекла на дно герметичного кожуха реактора.

В течение следующего дня имели место многочисленные попытки запустить циркуляцию в первичном контуре, осложнявшиеся взрывами водорода. В течение месяца реактор был остановлен.

Ядерное топливо осталось внутри герметичного кожуха. Однако в ходе аварии в атмосферу было выброшено большое количество радиоактивных газов. Полная активность выброшенных газов (в основном инертных) оценивается в 2.5 миллиона кюри, однако на долю вредного для здоровья (из-за накопления в щитовидной железе) йода-131 приходилось около 15 кюри. Около 200 м³ заражённой воды было сброшено в реку Саскуэханна. Была проведена эвакуация 140000 беременных женщин и детей дошкольного возраста.

Последующие оценки показали, что по результатам аварии дополнительная доза радиации составила в среднем около 8 мбэр для жителей 10-мильной окрестности станции (доза сравнимая с получаемой при рентгенографии), а максимальная зарегистрированная доза составила 100 мбэр (около трети годовой). Достоверных долговременных эффектов загрязнения местности или вреда для здоровья не зарегистрировано.

Топливо и остатки активной зоны извлекались с 1985 по 1990 годы. Всё это время первый энергоблок продолжал работать, его эксплуатация планируется до 2034 года.

Авария на Чернобыльской АЭС.

Чернобыльская АЭС находится на Украине в 110 километрах от Киева. Она состояла из 4 энергоблоков, вводимых в строй с 1977 по 1983 годы. Планировалось строительство ещё двух блоков. Реакторы РБМК-1000 (по одному на блок) имели тепловую мощность около 3 ГВт и электрическую в 1 ГВт каждый. Реактор РБМК — кипящий, в нём пар для турбин образуется непосредственно в активной зоне реактора. 26 апреля 1986 года на станции произошёл взрыв, разрушивший реактор и корпус энергоблока [114].

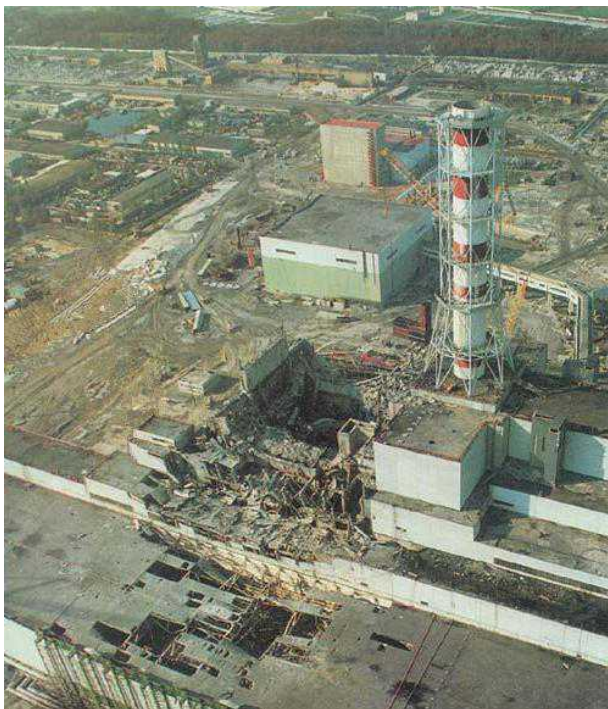


Рисунок 99: Четвёртый блок ЧАЭС после аварии. С сайта [114].



Рисунок 100: Схема заражения цезием-137 по результатам аварии на ЧАЭС. С сайта [114].

Взрыв явился результатом цепочки действий персонала станции, не допустимых в штатной эксплуатации, в сочетании с особенностями реактора РБМК. С 25 апреля реактор выводился из работы для проведения плановых работ. Были запланированы работы по проверке поведения оборудования в нештатной ситуации — проверялась возможность использования инерции ротора турбогенератора в качестве аварийного источника электроснабжения систем станции. Проведение этого эксперимента планировалось по достижению уровня тепловой мощности в 700-1000 МВт, однако в ходе выключения реактора диспетчер «Киевэнерго» запретил снижение мощности ниже 50% и почти сутки 25 апреля реактор работал в нештатной мощности (около 1500 МВт тепловых). Начавшееся при этом ксеноновое (йодное) отравление реактора¹ привело к тому, что для поддержания уровня мощности были почти извлечены стержни управления, что уменьшило запас регулирования реактора. При дальнейшем выключении реактора мощность менялась неравномерно. Однако было принято решение проводить эксперимент, несмотря на то что к моменту начала эксперимента реактор

¹ В цепочке распадов осколков деления образуется изотоп ^{135}I , из которого бета распадом с периодом полураспада около 7 часов образуется ^{135}Xe , который в свою очередь бета-распадом с периодом полураспада около 9 часов превращается в ^{135}Cs . Изотоп ^{135}Xe имеет очень большое сечение поглощения нейтронов. В рабочем режиме его концентрация поддерживается на постоянном уровне процессами поглощения нейтронов, образующихся при делении. При «выключении» реактора (при остановке цепной реакции) за время порядка 10 часов концентрация йода и ксенона возрастает, уменьшаясь примерно через сутки. В этот временной промежуток (иногда также называемый йодной или ксеноновой ямой) в реакторе есть избыток поглощающих изотопов и его штатный запуск становится невозможен.

подошёл нештатным образом и находился в нештатных условиях. Сама авария развивалась в течение одной минуты в 1:23 26 апреля 1986 года. С подключением части циркуляционных насосов по аварийной схеме к выбегающему по инерции ротору генератора началось снижение циркуляции воды и увеличение количества пара в активной зоне. Так как обычная вода поглощает нейтроны, увеличение количества пара и снижение уровня воды привело к увеличению тепловой мощности и к срабатыванию аварийной защиты. При введении аварийных поглощающих стержней проявился недостаток конструкции (так называемый «концевой эффект»), связанный с тем, что на концах поглощающих стержней из карбида бора (бор активно поглощает нейтроны) находились графитовые фрагменты (а графит, как уже обсуждалось, является хорошим замедлителем нейтронов). Таким образом, при введении стержней кратковременно в шахтах для поглощающих стержней вместо воды (поглотителя) в активной зоне оказывался непоглощающий и замедляющий нейтроны графит, что также приводило к увеличению мощности. А нештатное состояние системы управления с малым запасом реакции не позволило скомпенсировать этот кратковременный рост мощности. После этого в течение нескольких секунд произошёл разогрев активной зоны, разрушение ТВЭЛ и несколько (большинство свидетелей считает, что два) взрывов пароводородной смеси, разрушивших реактор и помещение энергоблока (рисунок 99).

В результате взрывов от 5 до 30% ядерного топлива было выброшено из реактора. Для того чтобы заглушить полностью реактор понадобилось сбрасывать в открытую активную зону поглотитель (борсодержащие соединения), свинец и доломиты. Остановленный реактор был закрыт бетонным саркофагом. После дезактивации территории были введены в строй 1, 2 и 3 энергоблоки, станция была полностью остановлена в 2000 году.

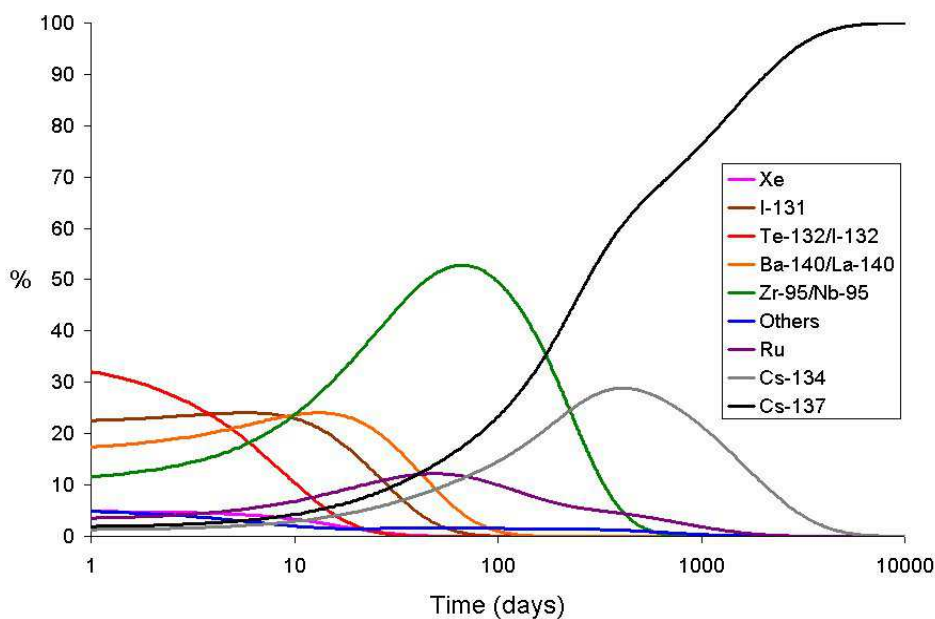


Рисунок 101: Относительный вклад различных изотопов в радиоактивное загрязнение после аварии на ЧАЭС. С сайта [114].

Говоря о последствиях Чернобыльской аварии надо несколько различать медицинские, экологические, экономические и правово-организационные последствия:

- 134 человека (персонал станции и пожарные) получили лучевую болезнь, около 50 из них умерло. ВОЗ оценивает, что в целом около 4000 человек умерло или умрёт из-за последствий аварии [112].
- Полученные дозы облучения меняются от 100 мЗв (10 бэр) у ликвидаторов до 10-20 мЗв (1 бэр) в районах, подвергшихся загрязнению. (Годовая естественная доза

составляет 1-10 мЗв/год)

- 135000 человек было эвакуировано из 30 километровой зоны вокруг станции и отдельных населённых пунктов, в том числе 50000 жителей Припяти. Около 300000 человек продолжает проживать в загрязнённых зонах «строгого контроля» и около 5 млн. человек в районах с меньшим уровнем загрязнения. Около 600000 человек участвовало в ликвидации аварии.
- Загрязнению долгоживущими изотопами подверглось более 200000 км², в основном в Белоруссии, Украине, России. Главную проблему в долгосрочной перспективе представляет долгоживущий цезий-137 (период полураспада 30 лет) (рисунки 100, 101).
- Последствия (повышение фона, опасное накопление радиоактивных изотопов в некоторых растениях и животных) были отмечены в европейских странах.
- Анализ грубых ошибок в информировании населения привёл к появлению норм закона прямо запрещающих сокрытие сведений, представляющих опасность для людей.
- Рост протестного «анти-атомного» движения привел к сворачиванию программ строительства и эксплуатации АЭС во многих странах.

Авария на АЭС Фукусима-1.

АЭС «Фукусима-1» состояла из 6 энергоблоков суммарной электрической мощностью 4.7 ГВт, ещё два энергоблока планировались к постройке. Энергоблоки вводились в строй с 1970 по 1979 годы. Все реакторы кипящего типа. На момент аварии работали реакторы 1-3, реакторы 4-6 были остановлены, из реактора 4 ТВЭЛы были перегружены в бассейн для остывания.

Авария, развивавшаяся одновременно на четырёх компактно расположенных энергоблоках 1-4 была спровоцирована землетрясением (самым сильным за зарегистрированную историю) и цунами 11 марта 2011 года [115]. Автоматическая система защиты заглушила работающие реакторы при первых толчках землетрясения. Однако примерно через час было прервано электроснабжение станции, необходимое для поддержания циркуляции через активную зону, которая остаётся горячей даже при остановке цепной реакции. Аварийное электроснабжение также оказалось прервано. Отсутствие охлаждения привело к цепочке похожей на чернобыльскую: разогрев активной зоны, рост температуры и давления, выделение водорода при реакции циркония с водой, расплавление активной зоны. Одновременно на 4 энергоблоке происходило закипание в хранилище отработанного топлива.

При ликвидации аварии производился сброс активных газов в атмосферу, имелись утечки заражённой воды в океан, взрывы пароводородной смеси привели к частичному разрушению реакторов и корпусов. В настоящий момент 4 энергоблока остановлены, планируется строительство саркофагов на блоках 1-3.

Эвакуирована 20 километровая зона вокруг АЭС, жителям 30 километровой зоны предложено эвакуироваться по желанию. Пострадало (госпитализировано) при ликвидации аварии 37 человек, в том числе 2 с радиационными ожогами. Заметные дозы радиации получило около 300 человек. Погибших от аварии двое, причина смерти — потеря крови от травм при разрушении зданий. Количество эвакуированных в районе станции составляет около 300000 человек, однако это число включает и эвакуированных из-за цунами.



Рисунок 102: Спутниковая фотография повреждённых блоков АЭС "Фукусима-1", сделанная 16 марта (5 дней после аварии). С сайта [115].

Перспективы.

После аварий на Чернобыльской АЭС и недавней аварии на АЭС Фукусима-1 в общественном мнении преобладает неприятие ядерной энергетики. В то же время, «быстрой» альтернативы АЭС нет: в России АЭС вырабатывают около 16% всего электричества, а во Франции — более 70%. По официальным данным [116] на 2010 год в США работало 104 гражданских атомных реактора, в странах Евросоюза — 143 (в том числе 58 во Франции), более 50 реакторов в Японии и около 30 в России. Таким образом, атомная энергетика продолжит работать ближайшее время. А с учётом совершенствования технологий — возможно и в будущем.

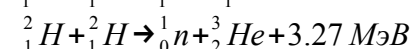
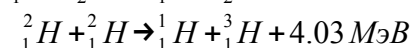
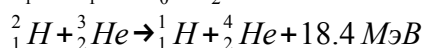
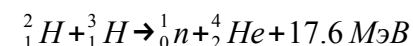
Термоядерная энергетика.

В качестве потенциального источника энергии с 50-х годов 20 века рассматривается управляемая термоядерная реакция — то есть реакция слияния лёгких элементов. Потенциальные выгоды от использования термоядерной энергии:

- Доступность «горючего». Дейтерий содержится в природной воде с концентрацией порядка 10^{-4} .
- Отсутствие радиоактивных отходов. В отличие от ядерной реакции деления не образуется долгоживущих изотопов.¹

Однако эти выгоды отделены от нас существенными физическими и техническими трудностями: для того, чтобы ядра сблизилась на расстояние действия ядерных сил, необходимо преодоление кулоновского барьера, что требует разогрева до большой температуры (миллионы градусов) и достижения достаточной плотности разогретой плазмы.

Отметим сразу, что «звёздная» протон-протонная реакция не подходит для управляемого синтеза, так как в реакции ${}^1_1p + {}^1_1p \rightarrow {}^2_1H + e^+ + \nu_e$ участвуют слабые силы. Это означает, что, даже если создать условия для протекания этой реакции, акты слияния протонов будут происходить редко — работающий реактор скорее всего должен будет иметь «звёздный» размер. Наиболее перспективными считаются реакции с участием изотопов водорода или гелия-3:



Дейтерий-тритиевая реакция наиболее легка в осуществлении, но тритий получается только искусственно и радиоактивен (период полураспада 12 лет). Перспективный практический интерес представляют безнейтронные реакции (например вторая и третья из списка выше), при которых исключается нейтронная радиация, но эти реакции более требовательны к условиям проведения. Отметим также, что изотоп гелия ${}^3\text{He}$, используемый во второй реакции², тоже редок — в настоящее время его получают для лабораторных применений как результат распада трития, накапливаемого для термоядерных боеприпасов [117]. «Естественный» гелий-3 на Земле сформирован в основном ещё в процессе формирования земли, его концентрация относительно гелия-4 составляет около 10^{-6} , гелий-3 на Земле сильно разбавлен гелием-4, образующимся при распадах тяжёлых элементов. В космосе концентрация гелия-3 относительно гелия-4 выше: она оказывается на уровне 10^{-4} . В связи с этим, пока как полу-фантастические проекты, обсуждается возможность добычи гелия-3 для термоядерной энергетики из лунного грунта или атмосфер газовых гигантов.

Нейтроны, образующиеся в дейтериево-тритиевой реакции уносят около 80% энергии и, будучи нейтральными частицами, не удерживаются магнитным полем ловушек. Одним из способов использования этой энергии является устройство дополнительной оболочки из

-
- 1 В утверждении об отсутствии радиоактивных отходов есть элемент лукавства: в некоторых реакциях ядерного синтеза образуются нейтроны, которые активно бомбардируют материал, из которого сделан реактор. В результате этой бомбардировки может наводиться радиоактивность в конструкционных материалах (и, соответственно, при утилизации реактора может возникать вопрос о хранении радиоактивных отходов), а сам реактор требует в том числе и радиационной защиты при работе.
 - 2 Гелий-3 активно используется в лабораториях в физике низких температур и для детектирования нейтронов, а также в медицине для ЯМР-томографии лёгких.

лития. В ней происходит реакция ${}_0^1n + {}_3^6\text{Li} \rightarrow {}_1^3\text{H} + {}_2^4\text{He} + 4.73 \text{ МэВ}$, и кинетическая энергия образовавшихся трития и гелия при замедлении переходит в тепло. Альтернативно обсуждается возможность устройства комбинированного реактора: если зону, в которой идёт дейтерий-тритиевая реакция, окружить оболочкой из урана-238 (самого распространённого изотопа урана), то в этой оболочке могут идти реакции деления быстрыми нейтронами с выделением энергии и наработка плутония-239.

Для успешного прохождения реакции синтеза необходимы два условия:

1. Достаточно высокая температура, так что кинетическая энергия ядер становится достаточной для преодоления кулоновского барьера. Для дейтерий-тритиевой реакции это условие $T > 10^8 \text{ К}$, для дейтерий-гелиевых требуется большая температура $T > 10^9 \text{ К}$.
2. Достаточно высокая концентрация плазмы n и достаточно длительное время удержания плазмы τ . Для дейтерий-тритиевой реакции это условие (условие Лоусона) $n\tau > 10^{14} \text{ сек/см}^3$.

Обсудим несколько способов создания условий для контролируемой термоядерной реакции.

Мюонный катализ.

Этот, несколько неожиданный, способ связан с использованием дополнительной частицы — мюона. Он позволяет осуществлять термоядерный синтез без использования очень высоких температур [118], [119], [120], [121].

Мюон μ^- — это частица с массой 207 электронных масс и временем жизни¹ порядка $2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$, несущая отрицательный заряд, равный заряду электрона. Объединяясь с протоном (дейтроном или ядром трития), мюон может образовывать нейтральный мезоатом. Его структура подобна атому водорода, но, из-за большей массы лёгкой частицы в атоме, размер атома («первый боровский радиус») оказывается примерно в 200 раз меньше. При присоединении ещё одного протона (дейтрона или ядра трития) образуется аналог молекулярного иона водорода (мезомолекулярный ион) в котором расстояние между ядрами изотопа водорода оказывается порядка 10^{-12} м (в те же 200 раз меньше, чем расстояние между атомами водорода в «обычной» молекуле водорода).

При этом (хотя это расстояние всё ещё в 100 раз больше радиуса действия ядерных сил) уже оказывается достаточно вероятным туннелирование ядра под кулоновским барьером и становится возможным протекание реакции слияния ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_0^1n + {}_2^4\text{He} + 17.6 \text{ МэВ}$. Сближение двух ядер изотопов водорода на такое расстояние в обычной, «горячей», схеме требует энергии в несколько кэВ, что соответствует температурам в десятки миллионов градусов.

После синтеза мюон может освободиться и простимулировать так же следующую реакцию, то есть мюон оказывается катализатором этой реакции.² За время жизни мюона может произойти порядка десяти тысяч дейтерий-тритиевых реакций, однако есть шанс захвата мюона образующейся альфа-частицей с образованием мезоатома (точнее, мезоиона) гелия, что прерывает цепочку реакций.

Возможность такой каталитической реакции была предсказана в работах А.Д.Сахарова и английского учёного Ф.Ч.Франка ещё до 50-х годов, Я.Б.Зельдовичем в 1954 году.

¹ Отрицательный мюон распадается на электрон, мюонное нейтрино и электронное антинейтрино.

² В химии катализатором называют соединение, стимулирующее протекание реакции, но в этой реакции непосредственно не участвующее. Именно это происходит и с мюоном в рассматриваемом случае.

Экспериментально следы мюон-каталитического синтеза наблюдались Л.В.Альваресом в 1956 [122] (рисунок 103) (см. также нобелевскую лекцию Л.Альвареса [6]).

Этот способ не требует сверхвысоких температур — то есть является одним из вариантов «холодного» термоядерного синтеза, разрешённого законами природы. Однако для того, чтобы этот метод мог стать энергетически выгодным, необходимо превышение выделяемой энергии над затратами энергии на производство мюона. В каждом акте синтеза выделяется ~ 20 МэВ, а для получения мюона нужна энергия ~ 5 -10 ГэВ. То есть, необходимо, чтобы каждый мюон участвовал в примерно тысяче реакций, чему препятствует образование (с вероятностью порядка 1%) мезоионов гелия. По современным данным реально проведение цепочки всего из 100-150 реакций, так что чистая мюон-каталитическая термоядерная реакция является энергетически не выгодной. Обсуждается возможность использования такой реакции в качестве источника быстрых нейтронов либо в качестве элемента комбинированного реактора, в котором образующиеся быстрые нейтроны используются для деления урана-238 и производства плутония.

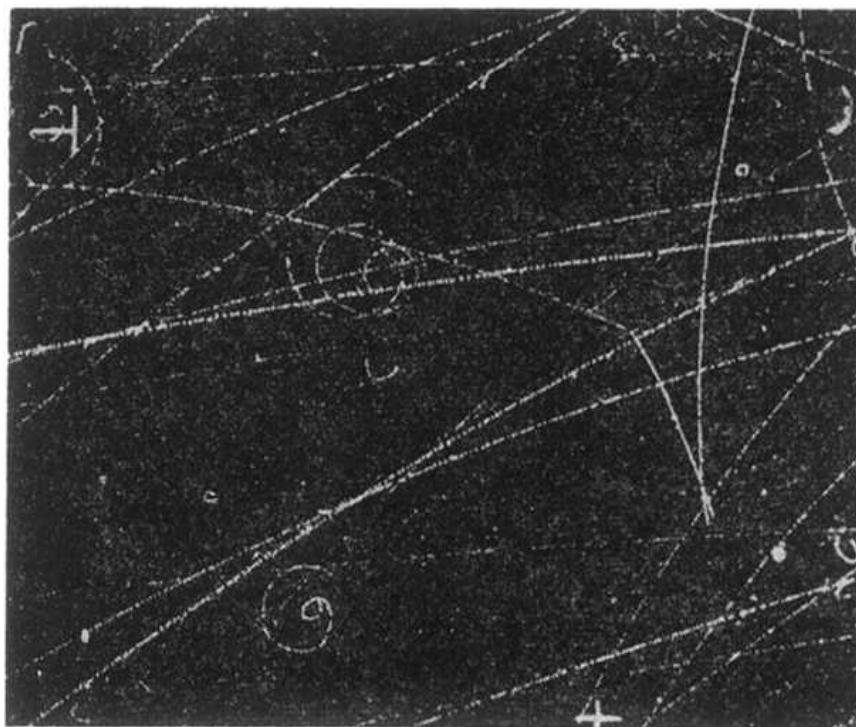


Рисунок 103 Регистрация мюонного катализа термоядерной реакции в пузырьковой камере. Влетающий мюон(сверху) тормозится и образует мезомолекулу $\mu p d$. После небольшого дрейфа мезомолекулы (обратите внимание на разрыв в треке на время дрейфа) происходит синтез, мюон вылетает и через некоторое время претерпевает распад с образованием электрона (вылет электрона слева). Из статьи [122].

Импульсная реакция.

Одной из проблем традиционного «горячего» термоядерного синтеза является необходимость стабильного удержания горячей плазмы. Эту проблему можно попытаться обойти в импульсной схеме. В этом случае реакция синтеза запускается кратковременным (10^{-8} сек) нагревом небольших мишеней, содержащих «термоядерное горючее», при помощи мощных лазеров или пучков частиц. По критерию Лоусона при понижении времени удержания требуется большая плотность плазмы ($10^{22} \text{ 1/см}^3 = 10^{28} \text{ 1/м}^3$).

В настоящее время работы в этом направлении ведутся на установке NIF (National Ignition Facility, Национальный комплекс лазерных термоядерных реакций) в США (Ливерморская

национальная лаборатория им.Лоуренса, Калифорния) [123] (рисунки 104, 105, 106, 108, 107). Лазерная установка комплекса состоит из 192 лазеров, общей мощностью 500 ТВт (в импульсе), которые фокусируются на мишень размером несколько миллиметров. Импульс лазеров одновременно и нагревает мишень, и сжимает её за счёт реактивной силы при испарении внешних слоёв мишени.¹ Ожидается, что установка NIF даст положительный выход энергии.



Рисунок 104: Монтаж камеры установки NIF (1999). С сайта [123].



Рисунок 105: Мишень установки NIF (в пинцете держателя). С сайта [123].

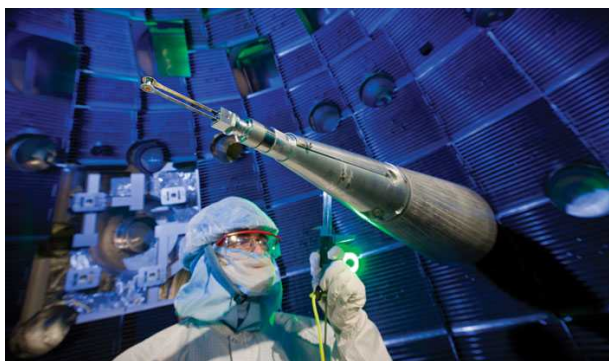


Рисунок 106: Центровка мишени установки NIF в камере. С сайта [123].



Рисунок 108: Один из двух лазерных комплексов NIF. С сайта [123].

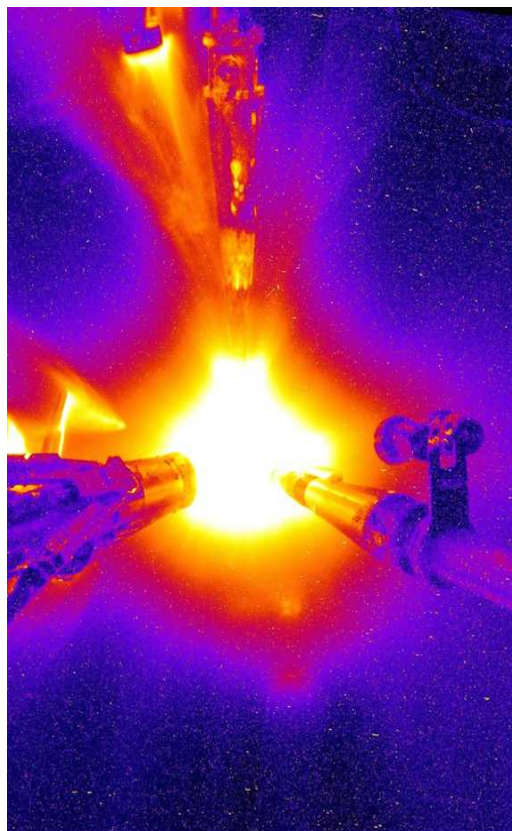


Рисунок 107: Вспышка дейтериево-тритиевого синтеза (эксперимент 7.02.2016) в установке NIF. С сайта [123]

¹ Строго говоря, в системе NIF лазеры нагревают не дейтерий-тритиевую мишень, а её окружение, которое, превращаясь в горячую плазму создаёт мощное рентгеновское излучение, действующее уже на мишень).

Квазистационарная реакция (токамаки).

В этой схеме предполагается долговременное (>1 сек) удержание плазмы. Это, с одной стороны облегчает требование по концентрации плазмы, связанное с критерием Лоусона, но с другой стороны требует специальных решений во избежание контакта горячей (десятки и сотни миллионов градусов) плазмы со стенками. Наилучшие результаты в этой схеме получены на установках типа «Токамак» (тороидальная камера с магнитными катушками) [124], [125], [126], [127].

Интересно отметить, что слово «токамак», как и «спутник» вошло в мировые языки. Идея токамаков была развита в работах О.А.Лаврентьева, А.Д.Сахарова, И.Е.Тамма, Л.А.Арцимовича. Первые токамаки начали строиться в Советском Союзе, а когда в 1968 на советском токамаке «Т-3» (рисунок 109) была достигнута температура удерживаемой плазмы в 10 млн. градусов, идея строительства таких систем была подхвачена в мире. Было построено несколько сотен таких установок. Так как для получения положительного выхода необходимо бороться с разного рода потерями, а относительные потери уменьшаются с размером системы (как отношение поверхности к объёму), размеры установок выросли настолько, что дальнейшее развитие стало возможным только в рамках международной кооперации.

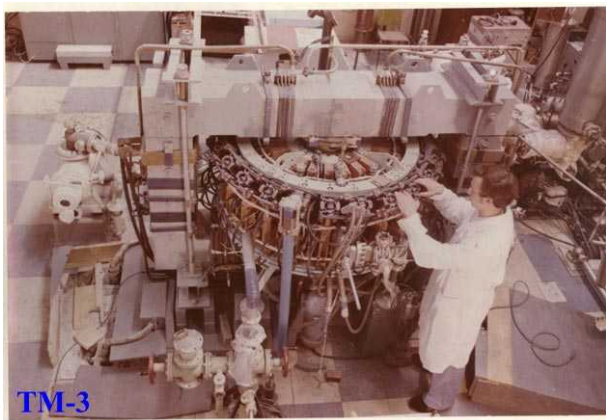


Рисунок 109: Токамак Т-3 (Курчатовский Институт). 1962 год. С сайта [125].

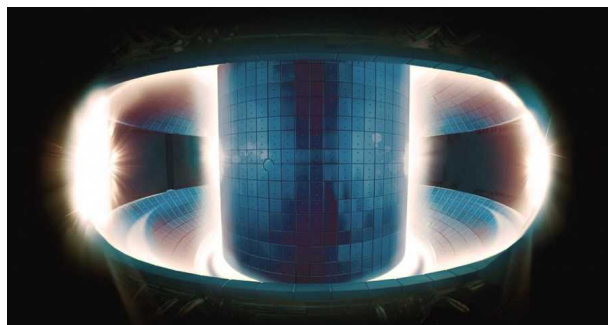


Рисунок 110: Удерживаемая магнитным полем плазма в токамаке KSTAR (Южная Корея). Видимое свечение происходит от холодных внешних слоёв, сам плазменный инур излучает в невидимом спектре. С сайта [126].



Рисунок 111: Тренировочная модель 1:1 токамака JET (Кулхэм, Великобритания). С сайта [127].

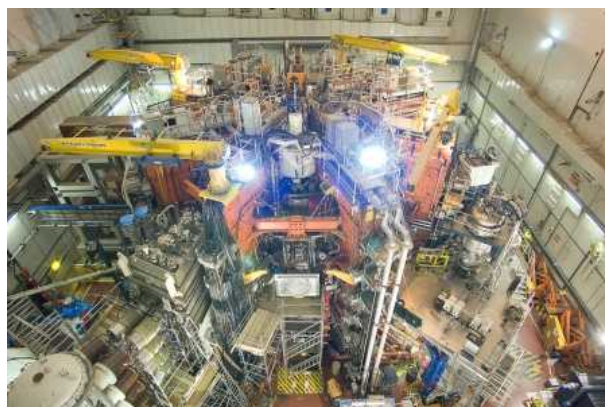


Рисунок 112: Зал токамака JET (Кулхэм, Великобритания). С сайта [127].

Крупнейшим проектом на настоящий момент является строящийся в Кадараше (Франция) Международный экспериментальный термоядерный реактор ITER [126], [128]. В проекте с 1985 года участвуют страны ЕС, Индия, Китай, Республика Корея, Россия, США, Япония. Строительство реактора уже начато, ожидается что к 2020 году реактор будет построен. Проектируемые характеристики реактора: дейтерий-третиевая реакция, высота 30 метров, общий радиус конструкции 10.7 метра, внутренний и внешний радиусы плазменного тора 2.0 и 6.2 метра, температура 100 миллионов градусов, длина импульса более 400 секунд, выделяемая (термоядерная) мощность 500 МВт.

Основные цели проекта ITER:

1. Получить выделяемую (термоядерную) мощность 500 МВт, что будет в 10 раз превышать подводимую мощность.
2. Продемонстрировать возможность создания промышленного термоядерного реактора.
3. Получить дейтерий-третиевую плазму, температура которой поддерживается за счёт термоядерной реакции.
4. Протестировать возможности наработки трития.
5. Продемонстрировать безопасную работу термоядерного реактора.

В дальнейшем (ориентировочно в 2040-2050 годах) на базе экспериментального реактора ITER планируется устройство электростанции DEMO с коммерчески производимой электроэнергией [129].

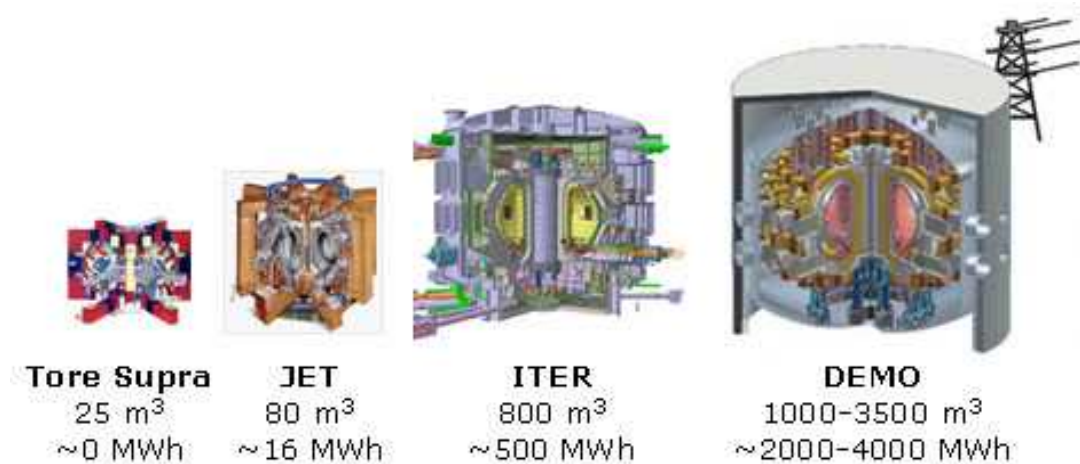


Рисунок 113: Сравнение размеров существующих токамаков Tore Supra и JET со строящимся реактором ITER. Высота токамака JET около 11 метров. С сайта [116].

В настоящее время идёт строительство комплекса ITER, в процессе строительства эксперименты проводятся на меньших установках в странах-участника проекта. Отметим несколько этапных результатов:

1. европейский токамак JET (Joint European Torus, Кулхэм, Великобритания [127]) в 1991 году продемонстрировал кратковременный (около 2 секунд) положительный выход энергии (1.7 МВт, температура плазмы 300 миллионов градусов, концентрация частиц $4 \cdot 10^{20} \text{ л/м}^3$), а в 1997 году была достигнута мощность энергетического выхода дейтерий-третиевой реакции в 16 МВт.
2. токамак Tore Supra (Кадараш, Франция [130]) в 2003 году удерживал плазму в течение 6 минут 30 секунд.

Лекция 4. Элементарные частицы.

История открытия элементарных частиц.

Рассмотрим историю открытия различных элементарных частиц (список неполон):

- 1897 год. Дж.Дж.Томсон открыл электрон, первую субатомную частицу. Дж.Дж.Томсон изучал катодные лучи (рисунки 114, 115) [131], [132], [133]. Томсон установил, что эти «лучи» состоят из частиц и измерил заряд и массу этих частиц, установив, что их масса менее одной тысячной массы самого лёгкого элемента — водорода. Дж.Дж.Томсон является Нобелевским лауреатом 1906 года, открытие электрона является частью нобелевских результатов (премия вручена «в признание большого значения его теоретических и экспериментальных исследований электропроводности газов»)

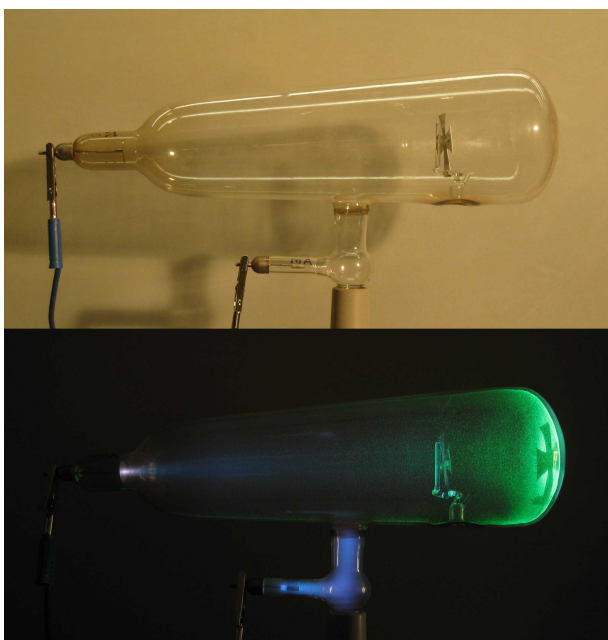


Рисунок 114: Демонстрация "катодных лучей". Сверху: неподключенная трубка Крукса. Снизу: разряд в трубке Крукса. В трубке Крукса создаётся разряд в разреженном газе между катодом (слева) и анодом (в центре внизу). При этом катод испускает "лучи" (электроны), которые создают засветку на фосфоресцирующем торце трубки (справа). Дополнительный электрод в форме мальтийского креста (обычно в этой демонстрации с потенциалом катода) отбрасывает "тень" на экран. С сайта [133].

- 1919 год. Э.Резерфорд показал, что протоны (ядра водорода) содержатся в ядрах других элементов. В этих опытах Резерфорд пропускал альфа-частицы через азот и обнаруживал возникновение энергичных частиц, эквивалентных ядру водорода. Как показали поздние исследования Блэккетта [68] (1924) (рисунок 116), при этом происходила реакция синтеза ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^{17}_8\text{O}$



Рисунок 115 Трубка, в которой Дж.Дж.Томсон провёл опыты, приведшие к открытию электрона. Катод располагается в левом (дальнем по рисунку) конце трубки, в средней части видна пара отклоняющих электродов, по действию которых было определено наличие заряда у электрона. С сайта музеев Кавендишской лаборатории [132].



Рисунок 116: Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Из работы Блэкетта [68]. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

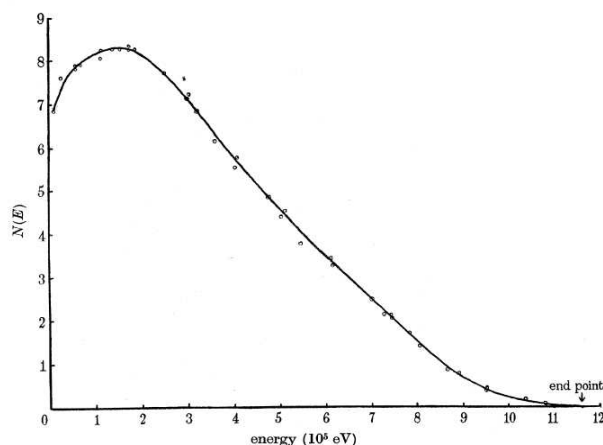


Рисунок 117: Энергетический спектр электронов при бета-распаде висмута-210. Из статьи [58].

- 1927 год. П.Дирак предсказал существование позитрона. В уравнении Дирака, объединяющем квантовую механику с теорией относительности, обнаружилось существование двух решений: одного, соответствующего обычному электрону, и второго, соответствующего частице с той же массой, но с отрицательной энергией. Эти частицы с отрицательной энергией в электромагнитном поле должны были двигаться как если бы у них был положительный заряд. П.Дирак является нобелевским лауреатом 1933 года «за открытие новых продуктивных форм представления квантовой теории», одним из следствий этого открытия было предсказание позитрона.
- 1931 год. В.Паули предсказал существование нейтрино. Данное предсказание связано с явлением бета-распада и с непрерывным спектром образующихся при бета-распаде электронов (рисунок 117). Если бы процесс был двухчастичным, то законы сохранения энергии и импульса однозначно определяли бы энергию вылетающего электрона. Паули предположил, что непрерывность спектра бета-частиц связана с присутствием третьей очень лёгкой нейтральной частицы. В.Паули является нобелевским лауреатом 1945 года, но эта премия связана с другим его открытием — принципом Паули.
- 1932 год. Д.Чедвик открыл нейтрон. Первые нейтроны были получены бомбардировкой энергичными альфа-частицами мишеней из лёгких элементов (бериллия) (рисунок 119). Д.Чедвик за своё открытие получил Нобелевскую премию 1934 года.
- 1932 год. К.Андерсон обнаружил в космических лучах позитроны — предсказанные Дираком частицы с массой, равной массе электрона, и положительным зарядом (Рисунок 118) [134]. Интересно заметить, что первым наблюдал космические лучи в камере Вильсона советский физик Д.В.Скобельцын в 1927. Следы «неправильных» электронных треков обнаруживались в опытах Скобельцына (СССР), Чао (Калтех, США), Жолио-Кюри (Франция), но эти исследования не придали значения своим

наблюдениям, считая их либо ошибкой эксперимента (например, перевернутой фотопластинкой), либо следом протона. К.Андерсон за открытие позитрона был удостоен Нобелевской премии 1936 года.

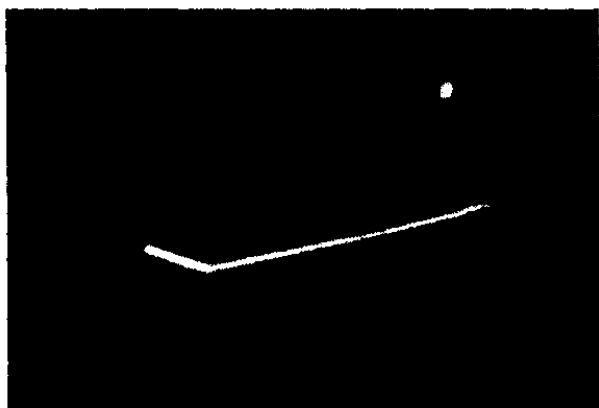


Рисунок 119: Трэки частиц, образовавшихся при расщеплении азота нейтроном (${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He}$). Трек нейтрального нейтрона не виден. Из нобелевской лекции Чедвика [6].

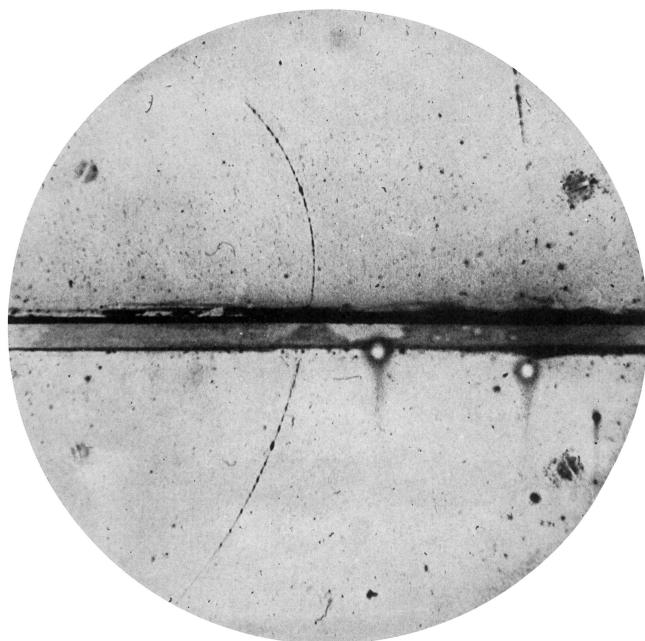


Рисунок 118: Трек первого достоверно обнаруженного позитрона в камере Вильсона (К.Андерсон). В центре кадра свинцовая пластина толщиной 6мм, большая кривизна трека в верхней части показывает, что позитрон прилетел снизу. Энергия позитрона до прохождения пластины (по кривизне трека в магнитном поле) 63 МэВ, после прохождения пластины 23МэВ. Из работы [134].

- 1935 год. Х.Юкава предсказал существование частиц-переносчиков сильного взаимодействия: пионов (или пи-мезонов). За это предсказание, подтверждённое позднее экспериментально, и за осознание роли таких частиц во внутриядерных взаимодействиях, Х.Юкава стал лауреатом Нобелевской премии 1949 года.
- 1936-37 год. В опытах К.Андерсона и С.Нидермайера, и, независимо, Д.Стрита и Е.Стивенсона, в космических лучах были обнаружены мюоны: частицы с отрицательным зарядом и массой примерно в 200 раз больше массой электрона (106 МэВ). Первое время эта частица считалась предсказанным Юкавой мезоном, однако дальнейшие исследования показали, что в сильном взаимодействии она не участвует.
- 1947 год. Группа под руководством С.Поуелла обнаруживает в потоках космических частиц другую частицу промежуточной массы: заряженный пи-мезон (масса покоя около 140 МэВ). Эта частица оказалась предсказанным Юкавой переносчиком сильного взаимодействия. С.Поул стал лауреатом Нобелевской премии в 1950 году «за развитие фотографического метода исследования ядерных процессов и за открытие мезонов при помощи этого метода».
- 1947 год. К.Батлер и Д.Рочестер обнаруживают в космическом излучении каоны (К-мезоны, масса покоя около 500 МэВ) и гипероны (Λ-гипероны, масса покоя более 1000 МэВ).

- 1955 год. На ускорителе протонов в Беркли открыт антипротон (Э.Сегре и О.Чемберлен, Нобелевская премия 1959). Антипротоны были получены при бомбардировке медной мишени протонами с энергией 6.3 ГэВ. Антипротоны также обнаруживают и в космических лучах.
- 1956 год. К.Кован и Ф.Рейнз обнаруживают электронное нейтрино (Ф.Рейнз стал лауреатом Нобелевской премии 1995 года). Кован и Райнз использовали в качестве источников нейтрино ядерный реактор (нейтрино образуются при бета распадах продуктов деления), поток нейтрино оценивался как $5 \cdot 10^{13} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{сек)}$. (Первоначально планировалось проведение опыта по поиску нейтрино во время ядерного взрыва.) В качестве детектора нейтрино использовалось около 200 литров воды. Ожидаемым событием было взаимодействие электронного антинейтрино с протоном: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, образующийся позитрон аннигилирует с электроном с образованием двух гамма-квантов, детектируемых по вспышкам на сцинтиляторе. Для дополнительной надёжности в воде растворялась соль кадмия-108, который при захвате нейтрона образует изомерное состояние кадмий-109m, который с периодом полураспада около 10 мксек испускает гамма-квант. Таким образом, при взаимодействии антинейтрино с протоном должно было наблюдаться две вспышки с интервалом в несколько микросекунд. Для защиты от космического фона, установка была расположена в 12 метрах под землёй (11 метров от реактора). Эксперимент фиксировал около 3 нейтрино в час. Для того, чтобы подтвердить их связь с реактором, реактор был остановлен для измерения контрольного уровня сигнала.

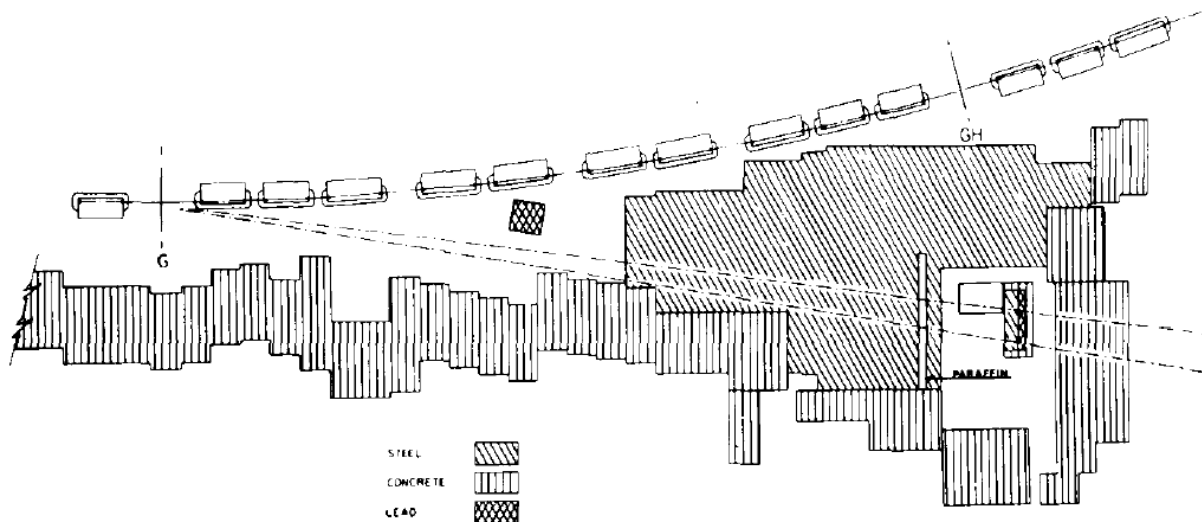


Рисунок 120: Схема опыта Ледермана, Шварца и Стейнберга по обнаружению мюонного нейтрино. Наклонная штриховка — стальные экраны, вертикальная штриховка — бетон, двойная штриховка — свинец. Пунктирные линии показывают примерное направление распространения попадающего на детектор пучка нейтрино. Толщина стального экрана на пути пучка около 13 метров. Из Нобелевской лекции Шварца [6].

- 1962 год. Л.Ледерман, М.Шварц и Д.Стейнбергер (Нобелевские лауреаты 1988 года) обнаружили другой вид нейтрино — мюонные нейтрино. Мюонное нейтрино в их экспериментах получалось при распаде К-мезонов: $K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu}$ и пионов $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu}$. Пионы и каоны образовывались при бомбардировке протонов с энергией несколько ГэВ бериллиевой мишени, после их распада за мишенью возникал «пучок нейтрино». Для экранировки детектора от прочих частиц была установлена 13 метровая стальная стена (собранная из броневого плит разбираемых линкоров)

(рисунок 120). В детекторе (искровой камере с алюминиевыми пластинами толщиной 2.5 см) наблюдалось примерно 1.5 «события» на 10^{16} протонов, попавших в мишень. Искомые события были образования мюонов при поглощении электроном мюонного нейтрино (рисунок 121). Всего было зарегистрировано несколько десятков таких событий (в первых опытах) и удалось показать, что мюонное нейтрино отлично от обнаруженного ранее электронного.

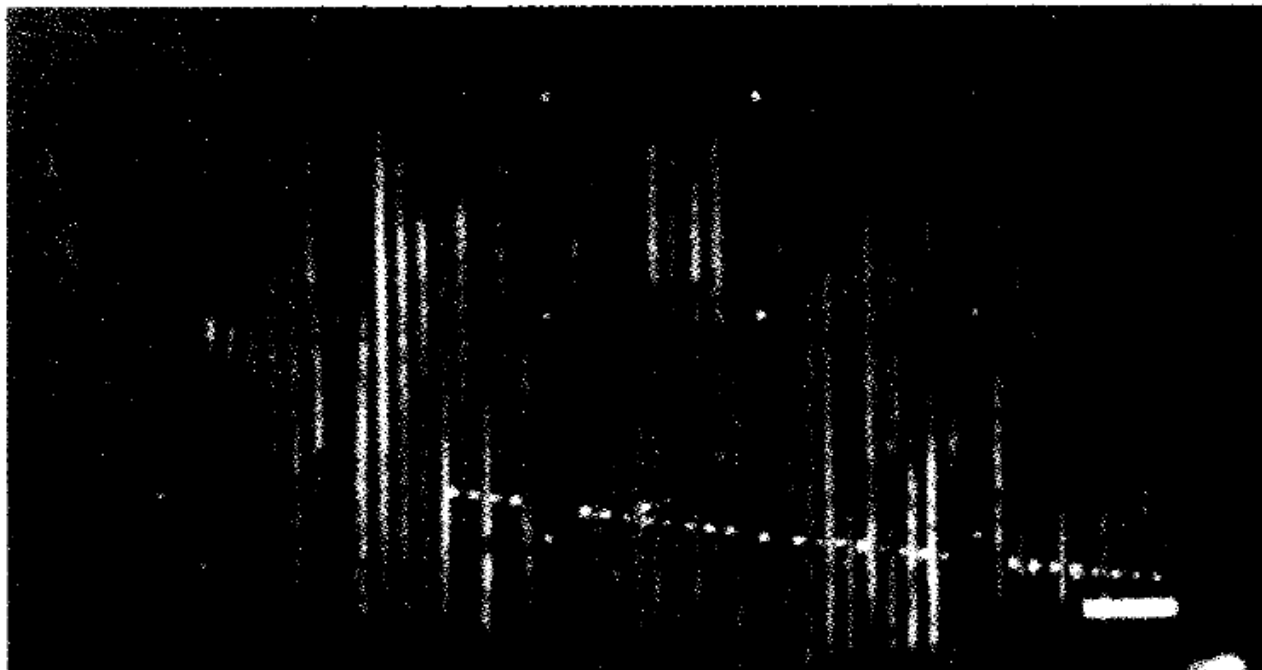


Рисунок 121: Возникновение мюона в искровой камере (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Трек мюона виден по пробоям между пластинами искровой камеры в месте пролёта частицы. Начало трека внутри камеры указывает на рождение мюона из материала, находящегося в камере, под действием нейтральной внешней частицы. Из нобелевской лекции Шварца [6].

- 1974 год. Рихтер и Тинг обнаружили тяжёлый J/Ψ -мезон (масса около 3.1 ГэВ). В этом мезоне проявилось существование четвёртого вида кварков - «очарованных». За открытие этой частицы Рихтер и Танг были удостоены Нобелевской премии 1976 года.
- 1977 год. В лаборатории Фермилаб в группе под руководством Л.Ледермана открыт ипсилон-мезон (Y -мезон), являющийся связанным состоянием кварка и антикварка. Масса покоя этой частицы 9.46 ГэВ.
- 1977 год. Мартин Перл обнаруживает тау-лептон (Нобелевская премия 1995 года). Масса покоя этого лептона 1.78 ГэВ. Перл обнаружил, что при столкновении электронов и позитронов с энергиями до 5-8 ГэВ (Стэнфордский линейный ускоритель) в части событий наблюдается нарушение законов сохранения, которое может быть объяснено образованием неизвестных тяжёлых частиц.
- 1979 год. На электрон-протонном коллайдере DESY (Гамбург, ФРГ) экспериментально подтверждено существование глюонов — частиц, переносящих взаимодействие между кварками, аналогов фотонов для сильного взаимодействия.
- 1983 год. К.Рубиа и С. ван дер Мер в экспериментах на встречных пучках протонов и антипротонов с энергиями 500 ГэВ (ЦЕРН) обнаружили экспериментально W и Z -бозоны, частицы-переносчики слабого взаимодействия. За это открытие они были удостоены Нобелевской премии 1984 года.

- 1995 год. Экспериментальное открытие правдивого кварка в лаборатории Фермилаб.
- 2000 год. В лаборатории Фермилаб показано отличие тау-нейтрино от электронного и мюонного нейтрино.
- 2012 год. Обнаружение в ЦЕРН бозона Хиггса.

Характеристики элементарных частиц.

Таким образом, в физике элементарных частиц известно множество частиц с разнообразными свойствами. Для описания этих частиц используются различные характеристики, которые иногда являются уже известными нам (масса, электрический заряд итд.), а иногда это оказываются специфичные для ядерной физики «заряды» (барионный, странность итд.). Эти дополнительные характеристики возникают из обобщения наблюдаемых процессов взаимодействия и формулировок законов сохранения в этих процессах. Ситуация отдельно усложняется тем, что для некоторых из введённых таким образом характеристик законы сохранения выполняются в одних процессах (например, с участием сильного взаимодействия), но не выполняются в других (например, с участием слабого взаимодействия).

Названия для некоторых из этих характеристик придумывались исходя из «духа момента», а потом иногда менялись под действием мнемонических правил — поэтому возникают такие «нефизические» названия как «странность частицы» или «цвет кварка». Такие наименования надо принимать как исторически сложившиеся, их происхождение связано либо с шуткой первооткрывателя, либо с необходимостью найти какое-то слово, описывающее похожие градации в языке, сложившемся задолго до быстрого развития ядерной физики. При описании частиц на языке составляющих их кварков¹ дополнительные «заряды» оказываются автоматически учтёнными.

Дополнительные характеристики частиц называют также их «ароматами». Для единообразия, знак «аромата» частицы берётся совпадающим со знаком её электрического заряда.

Рассмотрим подробнее происхождение и смысл различных характеристик частиц.

Масса покоя.

Это просто масса частиц. Так как в физике высоких энергий приходится иметь дело с релятивистскими скоростями, существенной является именно масса покоя. По традиции и из соображений удобства она измеряется в энергетических единицах: электронвольтах и их производных. Она изменяется от нулевой для фотонов до масштабов ГэВ для тяжёлых частиц. Для массы в релятивистской физике закона сохранения нет — из-за взаимодействия частиц две частицы в связанном состоянии могут иметь меньшую массу покоя, чем они же порознь.

Электрический заряд Q.

Для частиц он кратен заряду электрона: $+2e$, $+e$, 0 , $-e$. Кварки имеют дробный заряд $+2e/3$ либо $-1e/3$, а антикварки, наоборот, имеют дробный заряд $-2e/3$ или $+e/3$. Для электрического заряда всегда выполняется закон сохранения.

¹ Считаем, что понятие кварка читателю уже немного знакомо и не требует систематического обоснования. Некоторые сведения из истории кварковой модели и экспериментальных предпосылок к ее развитию будут изложены далее.

Спин.

Спин — это собственный момент вращения частицы. Для частиц он обычно выражается безразмерным числом, при этом подразумевается, что для получения механического момента это число надо умножить на постоянную Планка «с чертой» $\hbar$. Спин частицы — это существенно квантовомеханическое понятие, спин любой частицы может быть либо целым ($0, 1, 2, \dots$) либо полуцелым ($1/2, 3/2, \dots$). Кроме этого, проекция спина S на любое направление квантуется и может принимать значения из ряда $\{-S, -S+1, \dots, S-1, S\}$ (всего $(2S+1)$ значение), и по принципу неопределённости проекции спина на разные направления не могут быть одновременно точно заданы.

Напомним, что от того целый спин или полуцелый зависит подчиняется ли частица статистике Ферми-Дирака (где действует запрет Паули) или статистике Бозе-Эйнштейна.

Для спина (момента вращения) всегда выполняется закон сохранения.

Спин, как собственный момент вращения, определён только в системе покоя частицы. Поэтому для безмассовых частиц (фотонов) понятие спина, строго говоря, не применимо. Вместо него возникает более сложное понятие мультиплетности фотона [1], связанное с правилами отбора при излучении или поглощении и часто формально близкое к понятию собственного момента вращения.

Барионное число В (барионный заряд).

Опыт показал, что в ядерных процессах сохраняется число протонов и нейтронов. Поэтому частицам был приписан барионный заряд. Он равен $+1$ для барионов (протонов, нейтронов и других частиц из трёх кварков), 0 для мезонов (пар кварк-антикварк) и -1 для антибарионов (три антикварка). Барионный заряд можно связать с кварковым составом частицы: $B = \frac{1}{3}(n_q - n_{\bar{q}})$, где n_q - число кварков, а $n_{\bar{q}}$ - число антикварков. Закон сохранения барионного заряда теоретически может нарушаться в условиях большой плотности барионов и их высоких энергий. Такие процессы предположительно ответственны за избыток материи над антиматерией в нашей Вселенной, но в эксперименте таких нарушений пока не наблюдалось. Понятие барионного заряда появилось до возникновения кварковой модели, для сохранения привычного понятия кваркам также приписан барионный заряд $1/3$ ($-1/3$ для антикварков).

Лептонное число L (лептонный заряд).

Аналогично барионному числу, лептонное число выражает полное число лептонов (электронов, мюонов и тау-лептонов) в системе. Лептонам приписывается лептонный заряд $+1$, а их античастицам -1 . Из-за эффекта осцилляции нейтрино лептоны одного вида могут превращаться в лептоны другого вида, поэтому отдельно число электронов, мюонов и тау-лептонов не сохраняется. Аналогично барионному заряду, полное число лептонов могло не сохраняться на ранних этапах развития Вселенной.

Квантовое число "В-L".

Для учёта процессов превращения барионов в антилептоны и антибарионов в лептоны вместо барионного и лептонного чисел вводят их разность, которая сохраняется в таких процессах.

Сочетание барионов и антилептонов (и, наоборот, антибарионов и лептонов) связано с

традицией в обозначении частиц: барионы имеют положительный заряд, а лептоны, по исторически сложившимся обозначениям, отрицательный (соответственно, антибарионы несут отрицательный заряд, а антилептоны — положительный). Для выполнения строгого закона сохранения электрического заряда можно допустить только превращение бариона в антилептон (антибариона в лептон), что и приводит к такому «разностному» квантовому числу.

Странность S.

Концепция «странности» как некоторого неизвестного закона сохранения была введена Гелл-Маном и Нишиджимой для объяснения относительно большого времени жизни каонов и некоторых других частиц.

Так как эти частицы при столкновениях пучков в ускорителе всегда образуются парами, было предположено, что возникает некоторый новый закон сохранения: одна частица в паре получает условно положительный «заряд», другая — отрицательный «заряд». Эта новая характеристика получила название странности. Соответственно, в образующейся паре частица имела странность одного знака, а античастица — другого.

На языке кварковой модели странность частицы выражается через числа странных кварков и антикварков в её составе: $S = -(n_S - n_{\bar{S}})$, где n_S и $n_{\bar{S}}$ — числа странных кварков и антикварков. Знак «минус» связан с историческим наследием, проистекающим из соглашения о выборе знака ароматов частиц.

Странность не сохраняется при слабом взаимодействии. Например, возможен распад $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, в котором K^+ -мезон (странность 1) распадается на положительный мюон и нейтрино (оба с нулевой странностью). На языке кварковой модели это несохранение странности соответствует возможности изменения кваркового состава частицы из-за взаимных превращений кварков при посредстве слабого взаимодействия.

Очарование C.

Эта характеристика связана с числом очарованных с-кварков (charm quark) и антикварков в системе. $C = n_C - n_{\bar{C}}$ Очарование также не сохраняется при слабом взаимодействии.

Прелесть B'.

Это свойство частиц связано с наличием b-кварков и их антикварков: $B' = -(n_B - n_{\bar{B}})$. Знак «минус» опять связан с соглашением о выборе знака аромата по знаку заряда, поэтому у b-кварка прелесть равна -1 , а у его антикварка $+1$.

Отметим, что это свойство иногда называют по-разному из-за мнемонических причин и разных переводов. Изначально для соответствующего вида кварка было предложено слово «нижний» (английское bottom, bottom quark), от него возникло сокращение b-кварк, по первой букве которого возникло название «прелестный» или «красивый»: beautiful quark. о избежание путаницы следует иметь в виду, что «нижний кварк» в русской традиции относят к d-кварку (down quark).

Прелесть не сохраняется при слабых взаимодействиях.

Правдивость T

Это свойство связано с наличием t-кварков и их антикварков: $T = n_T - n_{\bar{T}}$.

Здесь также возможны несколько вариантов названий и их переводов. Символ «t» происходит от английского «top», то есть «верхний». Такой перевод может ввести в заблуждение, так как «up quark» в русской традиции также называется «верхним». Иногда в английском используется обозначение «truth quark», то есть «правдивый» или «истинный». В русской традиции во избежание путаницы используется вариант «правдивый» или «истинный».

Правдивость не сохраняется при слабом взаимодействии.

Изоспин I (I_z).

Эта характеристика (иногда также называемая изотопическим или изобарическим спином) связана с аналогией между правилами квантования спина и свойствами частиц.

Было обнаружено, что частицы группируются по массе покоя в ансамбли, внутри которых частицы проявляют одинаковые свойства в смысле сильного взаимодействия. Например, протон и нейтрон одинаково взаимодействуют через сильное взаимодействие, а их массы различаются примерно на 2.5 электронных массы, то есть менее чем на 0.2%. Аналогичными свойствами обладает триплет пионов $\pi^+ \pi^0$ и π^- .

Было предложено рассматривать такие группы (изотопические мультиплеты) как состояния с одним изотопическим спином, а различные частицы в мультиплете рассматривать как состояния с различной проекцией изоспина в некотором «изотопическом пространстве». Например, протон и нейтрон имеют изоспин 1/2, протон имеет проекцию +1/2, нейтрон проекцию -1/2.

Проекция изоспина частицы может быть выражена через её кварковый состав, она зависит от наличия верхних и нижних (u и d) кварков и их антикварков: $I_z = \frac{1}{2}((n_u - n_{\bar{u}}) - (n_d - n_{\bar{d}}))$.

Например, для протона (кварковый состав uud) $I_z = \frac{1}{2}(2 - 1) = \frac{1}{2}$, а для нейтрона (кварковый состав udd) $I_z = \frac{1}{2}(1 - 2) = -\frac{1}{2}$

Изоспин сохраняется при сильном взаимодействии, но не сохраняется при слабом взаимодействии.

Слабый изоспин T (T_z).

Как и изоспин, эта характеристика введена по аналогии с правилами квантования спина, но здесь выбирались группы частиц, которые одинаково ведут себя при слабом взаимодействии. Кваркам u, c, t и нейтрино приписывается проекция слабого изоспина $I_z = +1/2$, кваркам d, s, b и лептонам приписывается $I_z = -1/2$.

Слабый изоспин сохраняется при слабом взаимодействии. Заряженные W-бозоны и нейтральный Z^0 -бозон, являющиеся переносчиком слабого взаимодействия также характеризуются слабым изоспином $I=1$: для W^+ $I_z = +1$, для W^- $I_z = -1$, для Z^0 $I_z = 0$.

Например, при бета-распаде нейтрона $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ в левой части уравнения проекция слабого изоспина равна нулю, в правой части для электрона $I_z = -1/2$, для антинейтрино $I_z = +1/2$ и суммарно I_z также равно нулю.

Чётность P.

Понятие чётности (точнее, пространственной чётности) связано с исследованием того, как меняется волновая функция системы при инверсии всех координат: $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$. Так как при двукратном повторении этого преобразования получается тождественное преобразование, то остаётся всего два варианта: волновая функция частицы может либо менять знак при инверсии (в школьной математике этому соответствует нечётная функция $f(-x) = -f(x)$), либо не менять знак (чётная функция $f(-x) = f(x)$).

Так как в квантовой механике возможно существование суперпозиции возможных состояний, то чётность волновой функции для всех состояний одной частицы должна быть одна и та же, то есть чётность — это вполне определённая характеристика частицы.

В кварковой модели кварки имеют пространственную чётность +1, а антикварки имеют пространственную чётность -1. При вычислении чётности системы многих частиц чётности перемножаются.

Чётность не сохраняется при слабых взаимодействиях.

СРТ-инвариантность и несохранение чётности.

В физике законы сохранения тесно связаны с какой-то симметрией. Например, в классической механике однородность времени связана с сохранением энергии, однородность пространства — с сохранением импульса, а изотропность пространства с законом сохранения момента импульса (утверждение известно как теорема Э.Нетер). Поэтому и в физике элементарных частиц важным вопросом являлось понимание симметрий законов взаимодействия частиц относительно некоторых общих преобразований.

Среди таких общих преобразований выделяют три: обращение заряда (операция C: для всех зарядов и ароматов $q \leftrightarrow -q$), пространственная инверсия (операция P: $(x, y, z) \leftrightarrow (-x, -y, -z)$) и обращение времени (операция T: $t \leftrightarrow -t$). Для иллюстрации отметим, что законы механики не меняются при преобразованиях P (очевидно) и T (обратится направление скорости).

Существует строгое утверждение, что поведение системы не изменится при одновременном проведении операций C, P и T. Это утверждение называется СРТ-симметрией.

Физики долгое время считали, что симметрия по отношению к пространственной инверсии является фундаментальной — природа не знает, куда направлены нами оси координат. И, соответственно, чётность является хорошей сохраняющейся величиной. Однако в 50-х годах было обнаружено, что каон может распадаться как в три пи-мезона $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$, так и в два пи-мезона $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$. Такие процессы невозможно описать с сохранением чётности (из других измерений было известно, что и каоны, и пионы имеют отрицательную пространственную чётность). В 1956 году Ч.Ли и Ч.Янг предсказали возможность нарушения сохранения чётности при слабом взаимодействии (Нобелевская премия 1957 года). Это предсказание было проверено в экспериментах Ц.Ву по асимметрии бета-распада кобальта [135], [136].

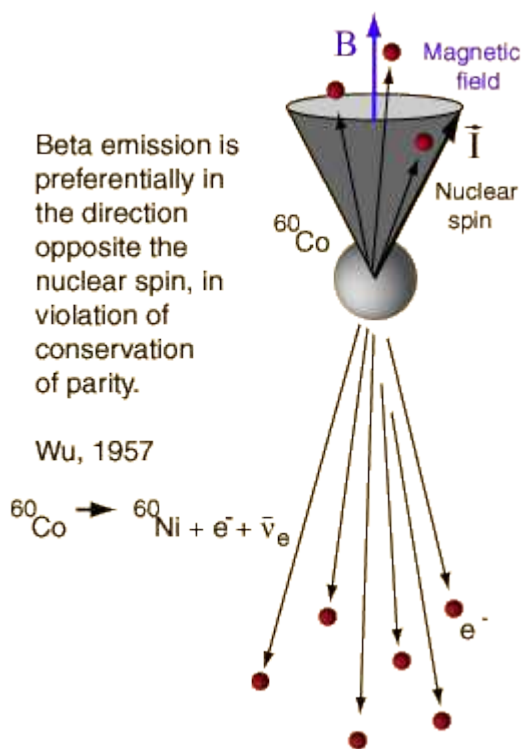


Рисунок 122: Схема эксперимента Ц.Ву. С сайта [136].

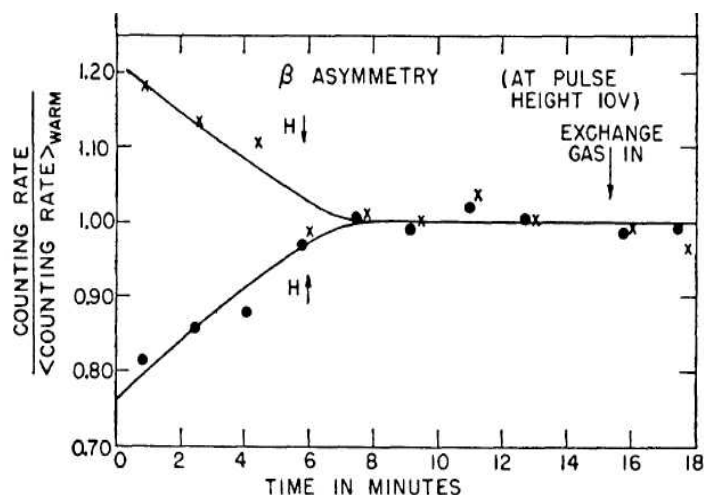


Рисунок 123: Различие числа отсчётов счётчика бета-частиц при разном направлении поляризирующего магнитного поля. В момент $t=0$ достигалась минимальная температура образца кобальта, затем образец нагревался из-за теплоподвода и выделения тепла при распаде, и поляризация пропадала. Анизотропия бета распада поляризованных ядер характеризуется различием числа отсчётов в момент $t=0$. Из работы Ц.Ву [135].

В эксперименте Ц.Ву бета-радиоактивный кобальт охлаждался до температуры 10 мК, и ядра кобальта практически полностью поляризовались приложенным магнитным полем (рисунок 122). При пространственной инверсии магнитное поле не меняет своего направления¹. Тогда, если бы при процессах распада сохранялась чётность, то распределение вылетающих электронов по направлениям не должно было бы меняться при инверсии: то есть «вверх» и «вниз» должно было бы вылетать равное количество частиц. Однако эксперимент показал что это не так: большая часть (асимметрия ~40%, рисунок 123) из них вылетает в направлении, противоположном внешнему полю (против направления ядерного спина поляризованных ядер кобальта).

Этот и последующие эксперименты показали, что спин нейтрино всегда направлен против его направления движения, а спин антинейтрино — по направлению движения. Так как при пространственной инверсии меняется знак скорости, а спин не меняет знак (так как момент вращения – это произведение радиус-вектора на скорость), то для преобразования нейтрино в антинейтрино необходимо не только изменение знака соответствующих лептонных ароматов, но и пространственная инверсия. Таким образом, сохраняется инвариантность относительно комбинированного преобразования СР.

Однако дальнейшие эксперименты показали небольшое нарушение комбинированной СР-симметрии. Это наблюдение также связано с К-мезонами, за его открытие Кронин и Фитч удостоились Нобелевской премии 1980 года. Проиллюстрировать это нарушение проще всего на примере также связанном с каонами, но отличном от эксперимента Кронина и Фитча. Нейтральный K^0 -мезон проявляется в эксперименте в виде двух комбинаций каона и антикаона: долгоживущей K_L^0 и короткоживущей K_S^0 . Долгоживущая комбинация может распадаться по двум каналам: $K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ и $K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$. Применение СР

¹ Чтобы это доказать нужно рассмотреть виток с током, создающий поле: при инверсии относительно центра точки перемещаются в диаметрально противоположные, но направление обхода контура не изменяется

преобразования к правой части этих уравнений переводит одну из них в другую (меняется знак пиона и электрона, нейтрино заменяется на антинейтрино), однако на эксперименте позитронный канал распада оказывается на 0.033% вероятнее электронного, что указывает на небольшое нарушение СР-симметрии в процессе распада. Это нарушение возможно связано и с избытком материи над антиматерией в нашей Вселенной.

Нарушений комбинированной СРТ-симметрии обнаружено не было.

Частицы и античастицы.

Пусть есть частица с некоторым зарядом и набором ароматов. Античастицей для неё будет называться частица, у которой та же масса, а заряд и ароматы имеют другой знак. Возможен случай, когда частица и античастица совпадают (если все ароматы и заряды нулевые): например в семействе пионов π^+ , π^0 и π^- заряженные π^+ и π^- являются частицей и античастицей, а нейтральный пион π^0 сам является для себя античастицей. Такие частицы иногда называют истинно нейтральными — чтобы подчеркнуть, что у них нулевой не только электрический заряд. В частности, фотон является истинно нейтральной частицей.

В кварковой модели для получения античастицы составной частицы необходимо заменить все кварки на антикварки и наоборот.

Аннигиляция.

Так как заряды и ароматы частиц связаны с законами сохранения (точными или приближёнными), то при взаимодействии частицы и античастицы суммарные заряды и ароматы до и после взаимодействия точно нулевые — то есть из пары частица-античастица может получиться либо несколько истинно нейтральных частиц, либо другая пара частица-античастица, либо их комбинация, лишь бы при этом выполнялись одновременно законы сохранения энергии и импульса. Такой процесс уничтожения частицы и античастицы называют аннигиляцией.

В силу закона сохранения энергии для лёгких частиц (электрона и позитрона, мюонов, протона и антипротона) наиболее вероятным является образование двух высокоэнергичных гамма квантов (так как фотон — безмассовая частица). Образование двух гамма квантов необходимо для выполнения закона сохранения импульса.¹ В экспериментах на высоких энергиях наблюдалось и образование тяжёлых частиц при аннигиляции.

Истинно нейтральная частица может «аннигилировать сама с собой». Так, истинно нейтральный π^0 мезон распадается на два гамма-кванта. Из-за этого его время жизни ($8.4 \cdot 10^{-17} \text{ сек}$) гораздо меньше времени жизни заряженных π -мезонов ($2.6 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$).

Антиматерия.

Так как античастицы проявляют такое же электрическое взаимодействие друг с другом, как и обычные частицы, возникает естественный вопрос о возможности существования связанных состояний античастиц: антиатомов, антимолекул и так далее. Вопрос этот давно решён в фантастической литературе, однако на практике он связан с различными сложностями.

1 У этого правила есть простое объяснение: для двух массивных аннигилирующих частиц мы всегда можем выбрать систему отсчёта, связанную с центром масс пары. В этой системе отсчёта полный импульс пары равен нулю. Импульс фотона в любой системе отсчёта не ноль, так как фотон всегда движется со скоростью света. Поэтому аннигиляция с образованием единственного фотона невозможна (но, в принципе, возможна аннигиляция пары частица-античастица с образованием единственной массивной истинно нейтральной частицы).



Рисунок 124: Зал антипротонного замедлителя (Antiproton Decelerator) в ЦЕРНе. С сайта [137].

В принципе, законы физики допускают существование антиматерии. Гипотетическая Вселенная из антивещества функционировала бы ничем не хуже нашей Вселенной из нормального вещества. Одной из важных проблем космологии является объяснение барионной асимметрии — избытка вещества над антивеществом в нашей Вселенной. Все современные данные говорят нам о том, что, хотя в природе и постоянно образуются античастицы (например, в позитронном бета-распаде), не существует областей, в которых преобладало бы антивещество. Наличие таких областей привело бы к появлению источников характерного гамма-излучения от аннигиляции на границе их контакта с областями нормальной материи, чего не наблюдается.

В лабораторных условиях получение антиматерии (лёгких «анти-элементов») является решённой задачей [137]. В ЦЕРН для получения антивещества используется специальный комплекс замедлителя антипротонов (Antiproton Decelerator). Антипротоны (точнее, пары протон-антипротон) образуются при бомбардировке металлической мишени протонами с энергией до 20 ГэВ. Один антипротон образуется примерно на миллион падающих на мишень протонов. Образовавшийся антипротон имеет скорость близкую к световой и его торможение до скорости около 10% световой является задачей комплекса замедлителя.

Отметим, что удержание антивещества является задачей, подобной по сложности задаче удержания плазмы при термоядерной реакции: нельзя допускать контакта со стенками из обычного вещества. Для ионизированного антивещества можно пользоваться магнитными или электрическими ловушками, нейтральные атомы удерживаются лазерными ловушками либо с использованием взаимодействия дипольных моментов атомов с внешним полем.

В результате, антивещество оказывается на данный момент самым дорогим веществом в мире. По некоторым оценкам [138] стоимость получения одного грамма антиводорода может составить более 60 миллиардов долларов США, а стоимость производства одного грамма позитронов составляет более 20 миллиардов долларов и примерно равна стоимости (в современных ценах) Манхэттенского проекта. По оценкам специалистов ЦЕРН, их антипротонный комплекс сможет производить 10 миллионов антипротонов в минуту. Даже если все антипротоны превратить в атомы антиводорода, наработка одного моля займёт примерно 100 миллиардов лет.

Перечислим некоторые достижения в области получения антивещества в лабораторных условиях:

- 1965 год. В ЦЕРНе получены ядра антидейтерия (связанное состояние антипротона и

антинейтрона). Почти одновременно ядра антидейтерия получены в Брукхэвенской национальной лаборатории (США).

- 1970 год. На Серпуховском ускорителе протонов (СССР, ИФВЭ) получено ядро антигелия-3.
- 1995 год. В ЦЕРНе получены первые атомы антиводорода. Позднее (1997) аналогичные результаты получены в лаборатории Фермилаб (США), где было получено около 100 атомов антиводорода.
- 1999 год. В ЦЕРН введён в строй замедлитель антипротонов (Antiproton Decelerator), который позволяет «остудить» образующиеся в высокоэнергетичных процессах антипротоны с энергий 3.5 ГэВ до 5.3 МэВ, а потом за счёт взаимодействия с электронной плазмой (электрон и антипротон не аннигилируют, так как они не являются друг для друга античастицами) и до энергий ~100 мэВ (соответствует температуре 1000 К). При смешивании холодных антипротонов с накопленными позитронами (образующимися в позитронном бета-распаде) образуются атомы антиводорода.
- 2002 год. ЦЕРН, в ловушке достигнуто удержание нескольких тысяч атомов антиводорода.
- 2011 год. ЦЕРН объявил об удержании 300 атомов антиводорода в течение 17 минут.
- 2011 год. В Брукхэвенской национальной лаборатории (США) зафиксировано образование ядра антигелия-4.

Семейства элементарных частиц.

Стандартная модель.

Совокупность современных знаний о структуре и свойствах элементарных частиц называют «Стандартной моделью». Эта модель сформировалась в 60-х — 70-х годах XX века в частности в работах Нобелевских лауреатов 1979 года Глашоу, Салама и Вайнберга. Модель описывает сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия между частицами. С открытием нейтральных слабых токов связанных с Z-бозоном (1973), прелестного кварка (1979), правдивого кварка (1995) и тау-нейтрино (2000) «Стандартная модель» получила достаточное экспериментальное подтверждение (все наблюдаемые в ускорительных экспериментах реакции и вероятности этих реакций с точностью не более 2-2.5 стандартных отклонений описываются «Стандартной моделью» [139]) и является принятой на данный момент. Строгое изложение «Стандартной модели» является предметом специализированных курсов ядерной физики, простейшие сведения могут быть найдены в [140]

«Стандартная модель» выделяет четыре вида фундаментальных частиц:

- калибровочные бозоны, ответственные за перенос электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий
- бозон Хиггса, ответственный за возникновение масс элементарных частиц
- лептоны
- кварки

Лептоны и кварки дополнительно группируются в три «поколения» по мере увеличения их массы. Современная теория считает, что обнаружение следующего поколения ещё более

«Стандартная модель» несомненно не является окончательной — например, она требует коррекции для учёта эффекта нейтринных осцилляций, а также не включает в себя гравитацию. Тем не менее, на данный момент она является наиболее точным описанием в физике частиц и описывает на языке 24 частиц¹ (6 кварков, 6 лептонов и их античастицы) и 12 переносчиков (фотон, 3 бозона для слабого взаимодействия и 8 глюонов для сильного взаимодействия).

The image displays a periodic table of elementary particles, organized into three main categories: Quarks, Leptons, and Gauge Bosons. Each particle is represented by a colored box containing its symbol, name, mass, and spin.

Quarks (Purple boxes):

- up:** mass = 2.3 MeV/c², spin = 1/2
- charm:** mass = 1.275 GeV/c², spin = 1/2
- top:** mass = 173.07 GeV/c², spin = 1/2
- down:** mass = 4.8 MeV/c², spin = 1/2
- strange:** mass = 95 MeV/c², spin = 1/2
- bottom:** mass = 4.18 GeV/c², spin = 1/2

Leptons (Green boxes):

- electron:** mass = 0.511 MeV/c², spin = 1/2
- muon:** mass = 105.7 MeV/c², spin = 1/2
- tau:** mass = 1.777 GeV/c², spin = 1/2
- electron neutrino:** mass < 2.2 eV/c², spin = 1/2
- muon neutrino:** mass < 0.17 MeV/c², spin = 1/2
- tau neutrino:** mass < 15.5 MeV/c², spin = 1/2

Gauge Bosons (Red boxes):

- gluon:** mass = 0, spin = 1
- photon:** mass = 0, spin = 1
- Z boson:** mass = 91.2 GeV/c², spin = 0
- W boson:** mass = 80.4 GeV/c², spin = 1
- Higgs boson:** mass = 126 GeV/c², spin = 0

Additional information on the left:

- mass →
- charge →
- spin →

The diagram illustrates the Standard Model of particle physics, showing the relationships between different types of particles and the forces that govern their interactions.

- Leptons:** A box on the left contains two groups of leptons:
 - Neutrinos: ν_e , ν_μ , ν_τ
 - Charged leptons: e , μ , τ
- Quarks:** A box on the right contains two groups of quarks:
 - Up-type quarks: u , c , t
 - Down-type quarks: d , s , b
- Gluons:** A central node labeled g (gluon) is connected to the quark box, representing the strong force.
- Photon:** A central node labeled γ (photon) is connected to both the lepton and quark boxes, representing the electromagnetic force.
- Higgs boson:** A central node labeled H is connected to all other particles (leptons, quarks, gluons, and weak bosons), representing the mechanism for mass generation.
- Weak bosons:** A box at the bottom contains $W^\pm$ and Z bosons, which are connected to all other particles, representing the weak force.

Рисунок 126: Схема взаимодействий между частицами "Стандартной модели". С сайта [140].

Отдельное место в «Стандартной модели» занимает бозон Хиггса. Это массивная частица с предсказанной массой покоя около 120 ГэВ. Теория предполагает, что взаимодействие частиц «Стандартной модели» с полем Хиггса² (с бозонами Хиггса) ответственно за наблюдаемые массы этих бозонов. Теоретическое предсказание этого механизма было сделано в середине 60-х годов 20 века, экспериментальное подтверждение существования частицы со свойствами бозона Хиггса было получено в ЦЕРН на Большом адронном коллайдере в 2012 году. За предсказание свойств этой частицы Ф.Энглерт и П.Хиггс в 2013 году получили Нобелевскую премию по физике.

Калибровочные бозоны.

Калибровочные бозоны — это частицы-переносчики взаимодействий: фотоны (переносят электромагнитное взаимодействие), W^+ , W^- и Z^0 -бозоны (слабое взаимодействие) и 8 глюонов (сильное взаимодействие). Эти частицы проявляются как виртуальные при передаче взаимодействия.

Фотоны — это наиболее привычные частицы, кванты электромагнитного поля. Фотонами могут обмениваться все частицы (и лептоны, и кварки), а также заряженные $W^\pm$ бозоны.

1 Без учёта «цветов» кварков и глюонов и считая, что нейтрино и антинейтрино являются разными частицами.

2) Также это взаимодействие называют полем Энглерта-Брауна-Хиггса, так как модель взаимодействия элементарных частиц, приводящая к появлению у них массы была одновременно предложена теоретиками из Брюсселя Ф.Энглертом и Р.Браутом и теоретиком из Эдинбурга П.Хиггсом.

Фотоны — безмассовые частицы, поэтому электромагнитное взаимодействие является дальнедействующим¹. Фотоны не имеют электрического заряда, спин фотона не определён из-за отсутствия системы отсчёта покоя для безмассовой частицы.

$W^\pm$ и Z^0 -бозоны отвечают за осуществление слабого взаимодействия [141], [142]. Это массивные частицы с массой 80.4 ГэВ и 91.2 ГэВ для $W^\pm$ и Z^0 -бозонов, соответственно. Эти массы почти в 100 раз превосходят массу протона и даже превосходят массу атома железа. Поэтому слабое взаимодействие является очень короткодействующим: как мы помним из оценки для пи-мезонов масса в 100-200 МэВ соответствует переносу взаимодействия на ядерный масштаб $10^{-14} \dots 10^{-15}$ метра (см. сноску на стр. 145). Соответственно, для слабого взаимодействия его радиус действия окажется ещё в 1000 раз меньше. То есть, как мы уже упоминали при рассмотрении бета-распада, слабое взаимодействие оказывается действующим на масштабах меньших внутриядерного — на внутринуклонных масштабах.

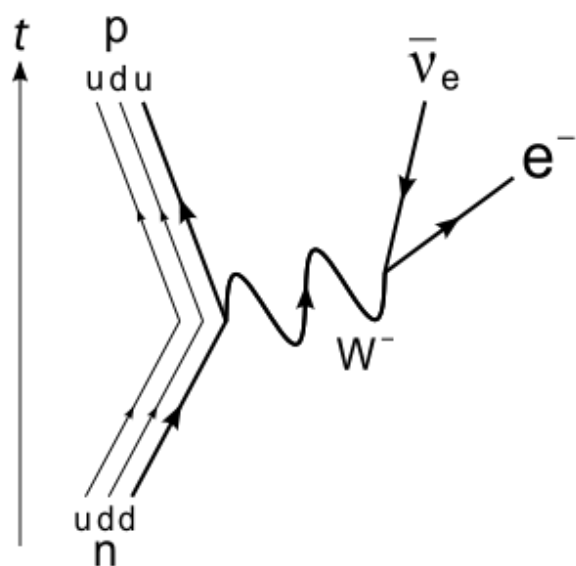


Рисунок 127: Схема (фейнмановская диаграмма) бета-распада. С сайта [141].

Weak interaction transformations of u and d quarks

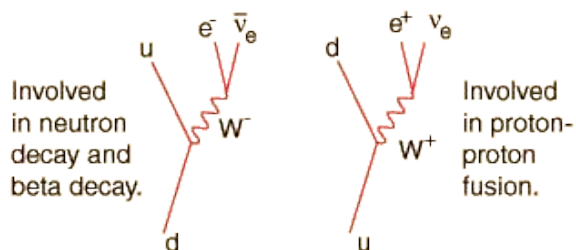


Рисунок 128: W-бозон в бета-распадах. С сайта [142].

Feynman diagrams of quark decay by weak interaction

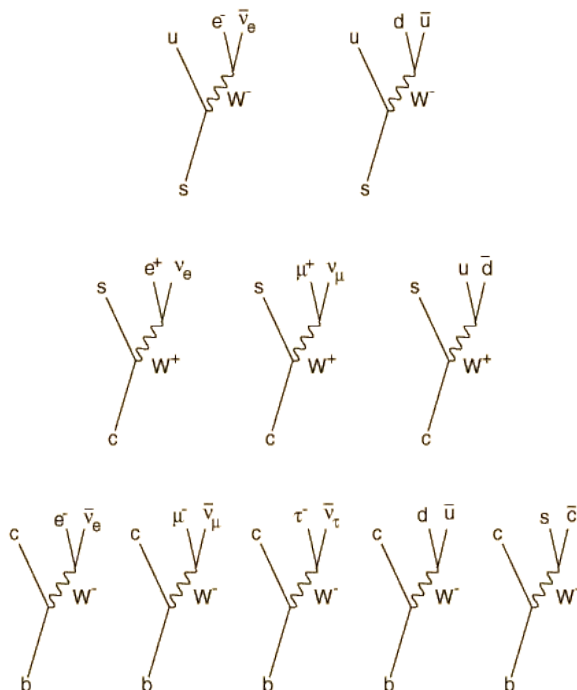


Рисунок 129: Диаграммы распада различных кварков с участием W-бозона. С сайта [142].

¹ Напомним, что для массивной виртуальной частицы время её «существования» определяется соотношением неопределённости $mc^2 \tau \sim \hbar$, а максимальное расстояние, на которое эта частица может переместиться за время τ равно $L = c \tau \sim \frac{\hbar}{mc}$ (о концепции виртуальных частиц см. также стр. 56)

Существование $W^\pm$ и Z^0 -бозонов было предсказано в конце 60-х, косвенные экспериментальные подтверждения были получены в ЦЕРНе в 1973 году (наблюдение взаимодействия нейтрино с электроном, описываемое как обмен Z^0 -бозоном), и наконец с вводом в строй Суперпротонного синхротрона (ЦЕРН) в 1983 году W и Z -бозоны были обнаружены в столкновениях протонов и антипротонов (Рубиа и ван дер Мер, Нобелевская премия 1984 года). Детали эксперимента изложены в Нобелевской лекции К.Рубиа [6]. При столкновении протона и антипротона, точнее при столкновении входящих в их состав кварков и антикварков, может образоваться $W^\pm$ бозон, который затем распадается в пару электрон-антинейтрино или позитрон-нейтрино. С меньшей вероятностью может образоваться нейтральный Z^0 бозон, который распадается в пару электрон-позитрон или мюон-антимюон. Детектировалось появление электронов с характерным для бета-распада распределением по энергии для заряженных бозонов, либо одновременный вылет пары лептон-антилептон для нейтрального бозона.

$W^\pm$ и Z^0 -бозоны имеют спин 1. $W^\pm$ -бозоны участвуют в процессах слабого взаимодействия с изменением электрического заряда, Z^0 -бозоны в процессах без изменения заряда. Они не имеют дополнительных ароматов. В свободном виде $W^\pm$ и Z^0 -бозоны нестабильны. W бозоны распадаются в лептон и нейтрино ($W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ и аналогично в мюонном и тау-каналах), либо в пары кварк-антикварк (распад в пару кварк-антикварк противоположен методу получения этих бозонов в вышеупомянутых опытах). В частности, превращение нейтрона в протон (и наоборот) при бета распаде сопровождается испусканием соответствующего W -бозона (напомним, что слабое взаимодействие не сохраняет ароматы кварков) (рисунки 127, 128, 129). Нейтральный Z -бозон распадается в пары электрон-позитрон (мюон-антимюон, тау-антитау), нейтрино-антинейтрино, пары кварк-антикварк.

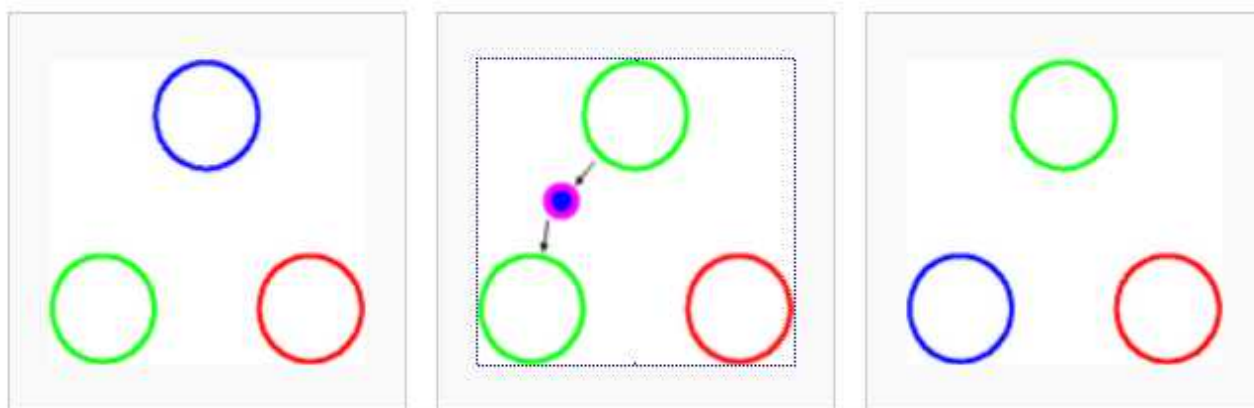


Рисунок 130: Изменение цвета кварка при испускании/поглощении глюона. Левое изображение: исходное состояние адрона с тремя разноцветными кварками. Среднее изображение: синий кварк испускает синий-антизелёный глюон и становится зелёным. Правое изображение: зелёный кварк поглощает синий-антизелёный глюон и становится синим. С сайта [143].

Последние, самые многочисленные и самые трудные для понимания калибровочные бозоны — это глюоны, частицы-переносчики сильного взаимодействия между кварками. По теоретическим представлениям глюоны безмассовые частицы.¹ Насчитывается 8 видов глюонов, которые обозначают комбинацией «цветовых зарядов», свойственных кваркам.

1 Необходимо предостеречь читателя от кажущейся лёгкости и наглядности картины взаимодействия кварков: эта картина является обобщением огромного количества сложно интерпретируемых экспериментальных фактов и её строгое описание уходит за рамки большинства университетских курсов физики. Наглядные слова о «цветах» кварков и глюонов, являются лишь выражением некоторых своеобразных законов сохранения. Выбор этих слов, как уже отмечалось, возникает исторически, иногда в чём-то случайно или в силу каких-то ассоциаций, а иногда и просто как шутка среди физиков-ядерщиков.

Концепция «цветового заряда» [143] кварков была введена для того чтобы объяснить, как в некоторых тяжёлых частицах три одинаковых кварка могут занимать одно и то же состояние (что запрещено для фермионов по принципу Паули). «Цветовой заряд» маркируется цветом (красный, зелёный, синий для кварков и анти-красный, анти-зелёный, анти-синий для антикварков). Глюон маркируется парой цвет/антицвет (красный-антизелёный, например), испускание-поглощение глюона сопровождается соответствующим изменением цвета. «Цветовой заряд» сохраняется при обмене глюонами. Все свободные частицы не имеют цветового заряда — они либо содержат полную тройку цветов, либо пару цвет-антицвет. Сильное взаимодействие проявляется только между цветными частицами. Всего возможно 9 комбинаций цвет-антицвет, однако отсутствие дальнего действия взаимодействия между бесцветными частицами указывает на то, что одна из комбинаций (так называемый «цветовой синглет») не реализуется (это несколько похоже на отсутствие фотонов с нулевой проекцией спина) — что в конечном итоге приводит к 8 возможным типам глюонов.

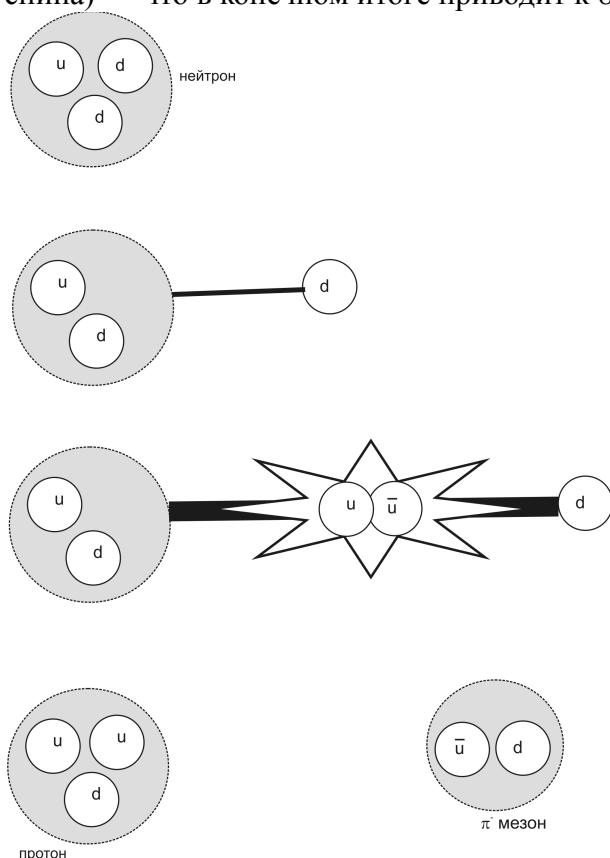


Рисунок 131: Образование пи-мезона при разрыве глюонной трубки. Цветовой заряд для простоты не показан.

Выбор цветов для «цветового заряда» условен, он связан тем, что красный, синий и зелёный это дополнительные цвета, при смешивании они образуют бесцветное состояние. Так как сам глюон несёт цветовой заряд, глюоны взаимодействуют друг с другом. В результате между двумя удаляемыми кварками возникает «глюонная трубка», энергия которой возрастает по мере удаления кварков. Возникает, говоря классическим языком, сила, увеличивающаяся с расстоянием между частицами. Однако, в квантовом мире, когда энергия этой трубки сравнится с энергией покоя пары кварк-антикварк с таким же цветовым зарядом (и антизарядом) возникает возможность разорвать трубку с образованием новой частицы. Например, при удалении от нейтрона (кварковый состав udd) одного d -кварка при разрыве трубки образуется пара самых лёгких верхних кварка и антикварка и мы получим протон (uud) и π^- -мезон (ud). Обе частицы бесцветные, то есть не связаны сильным взаимодействием. Пи-мезон в свою очередь может быть поглощён другим протоном, превращая его в нейтрон. Таким образом, глюоны оказываются отвечающим за взаимодействие внутри частиц, а между бесцветными частицами взаимодействие осуществляется за счёт обмена другими частицами (например, пионами).

Бозон Хиггса.

Экспериментальное подтверждение существования бозона Хиггса в 2012 году широко обсуждалось в средствах массовой информации (с громкими названиями об «открытии частицы бога») и в научных кругах. Это открытие является одним из важнейших фундаментальных открытий последних лет. Само это наблюдение показывает, что большие открытия в фундаментальной физике продолжают случаться и пока прочитана ещё далеко не последняя страница книги изучения Вселенной. Обзоры по этой теме могут быть найдены в литературе [139], [144], [145]. Мы ограничимся самыми простыми вопросами.

Во-первых, отметим, что предсказание о существовании поля Энглера-Брауна-Хиггса и бозона-переносчика этого поля (бозона Хиггса) было сделано в 60-х годах 20 века. Хотя это предсказание теоретически является вполне естественным для Стандартной модели (так что в существовании этого механизма взаимодействия большинство физиков-ядерщиков было уверено), для его экспериментального подтверждения понадобилось 50 лет прогресса в инструментальных методах ядерной физики. Наблюдение бозона Хиггса стало возможным только с запуском Большого адронного коллайдера¹ — одного из самых дорогих научных инструментов в истории со стоимостью строительства около 10 миллиардов долларов. Важно отметить, и это характерно подчёркивает логику развития науки, что Нобелевская премия теоретикам Хиггсу и Энглеру была присуждена только после экспериментального подтверждения существования предсказанного ими механизма.

Про бозон Хиггса часто говорят, что это та частица, из-за которой возникает масса. Это несколько условные слова, которые могут запутать неспециалиста. Напомним известный из теории относительности факт, что для безмассовых частиц (фотонов, например) энергия связана с импульсом как $E = pc$, а для частиц с ненулевой массой покоя

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2 c^2}. \text{ В Стандартной модели без бозона Хиггса нет внутренних причин}$$

считать различными переносчики электромагнитного и слабого взаимодействия, более того теория объединения электрослабого взаимодействия показывает, что на первых этапах жизни Вселенной эти два взаимодействия были одним целым. Это означает, что и переносчики слабого взаимодействия могли бы быть безмассовыми с точки зрения теории — это не так в реальном мире, но с точки зрения чистой теории у элементарных частиц стандартной модели не должно бы быть массы. Физики говорят об этом, как о некоторой симметрии в Стандартной модели [144]. Предсказание Хиггса и Энглера заключалось в предложении механизма нарушения такой симметрии: предложено некоторая формально допустимая возможность взаимодействия изначально безмассовых частиц с дополнительным полем, в результате которого связь энергии с импульсом у частицы меняется от безмассового закона

$$E = pc \text{ к закону } E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2 c^2}. \text{ Энергия массивной частицы не может быть меньше}$$

mc^2 , то есть масса в некотором смысле определяет «цену создания» частицы. Безмассовая частица может быть создана «даром», и роль взаимодействия Хиггса сводится к тому, что за счёт взаимодействия с полем Энглера-Брауна-Хиггса изначально безмассовая частица как-то искажает его и энергия этого взаимодействия создаёт конечную «цену» создания частицы. Грубой аналогией является отличие между движением стального шарика по жёсткой и эластичной поверхности: в первом случае при приложении минимального усилия шарик сразу начнёт движение, во втором случае он деформирует под собой основу и для его движения необходимо всё время «вылезать» из созданной ямки - «цена» перевода шарика в движущееся состояние становится конечной.

В результате бозон Хиггса определяет массы элементарных частиц и вводит пятое фундаментальное взаимодействие помимо гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного.

Как же «увидели» бозон Хиггса? Как всегда в ядерной физике речь идёт о некотором процессе взаимопревращения частиц в результате которого на детекторе обнаружили некоторое количество обычных частиц (электронов, фотонов). Бозон Хиггса является истинно нейтральной частицей, он может распадаться на разные комбинации частиц и

¹ Эксперименты по поиску бозона Хиггса велись и на других больших ускорителях. Постепенно накапливающиеся данные по косвенным наблюдениям сужали диапазон возможных масс новой частицы. Эксперименты на протон-антипротонных столкновениях в ускорителе Теватрон (США) позволили исключить существование частицы с массой меньше 110 МэВ и более 145 МэВ [145]. Эксперименты на Большом адронном коллайдере завершили эту гонку, позволив непосредственно статистически достоверно зафиксировать процессы, связанные с распадами именно бозона Хиггса.

античастиц. Для экспериментального обнаружения основными оказались [145] каналы распада на два фотона $H \rightarrow \gamma\gamma$ и на 4 лептона (2 лептона и два антилептона) через промежуточную пару истинно нейтральных Z-бозонов $H \rightarrow ZZ \rightarrow llll$. Другие возможные каналы менее удобны для экспериментального обнаружения таких распадов по разным причинам (более высокий фон, появление трудноуловимых нейтрино, малая вероятность, см. рисунок 132).

Decay channel	Branching ratio	Rel. uncertainty	Decay channel	Mass resolution
$H \rightarrow \gamma\gamma$	2.28×10^{-3}	+5.0% -4.9%	$H \rightarrow \gamma\gamma$	1-2%
$H \rightarrow ZZ$	2.64×10^{-2}	+4.3% -4.1%	$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-$	1-2%
$H \rightarrow W^+ W^-$	2.15×10^{-1}	+4.3% -4.2%	$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \ell^+ \nu_\ell \ell'^- \bar{\nu}_{\ell'}$	20%
$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$	6.32×10^{-2}	+5.7% -5.7%	$H \rightarrow b\bar{b}$	10%
$H \rightarrow b\bar{b}$	5.77×10^{-1}	+3.2% -3.3%	$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$	15%
$H \rightarrow Z\gamma$	1.54×10^{-3}	+9.0% -8.9%		
$H \rightarrow \mu^+ \mu^-$	2.19×10^{-4}	+6.0% -5.9%		

Рисунок 132 Слева: вычисленные в рамках Стандартной модели вероятности различных процессов распада бозона Хиггса для массы бозона 125 МэВ. Справа: точность определения массы бозона Хиггса для разных процессов распада. Из [145].

Возникновение бозона Хиггса является процессом обратным распаду. С некоторой вероятностью бозон Хиггса может образовываться при столкновении достаточно энергичных частиц, на Большом адронном коллайдере сталкивались два пучка протонов.

В эксперименте детектировалось возникновение после столкновения пары гамма-квантов или четвёрки лептонов, по их суммарной энергии и импульсу можно было определить массу покоя распадающейся частицы. При этом необходимо было исключить все возможные процессы образования других частиц при столкновениях. В результате анализа статистики, накапливаемой более года в двухфотонных и четырёхлептонных процессах распада (рисунки 133, 134) был зафиксирован статистически достоверный избыток событий, соответствующий образованию при протон-протонных столкновениях нейтральной частицы массой $M c^2 = 125.8 \text{ МэВ}$, по всем характеристикам совпадающей с предсказываемым теорией хиггсовским бозоном.

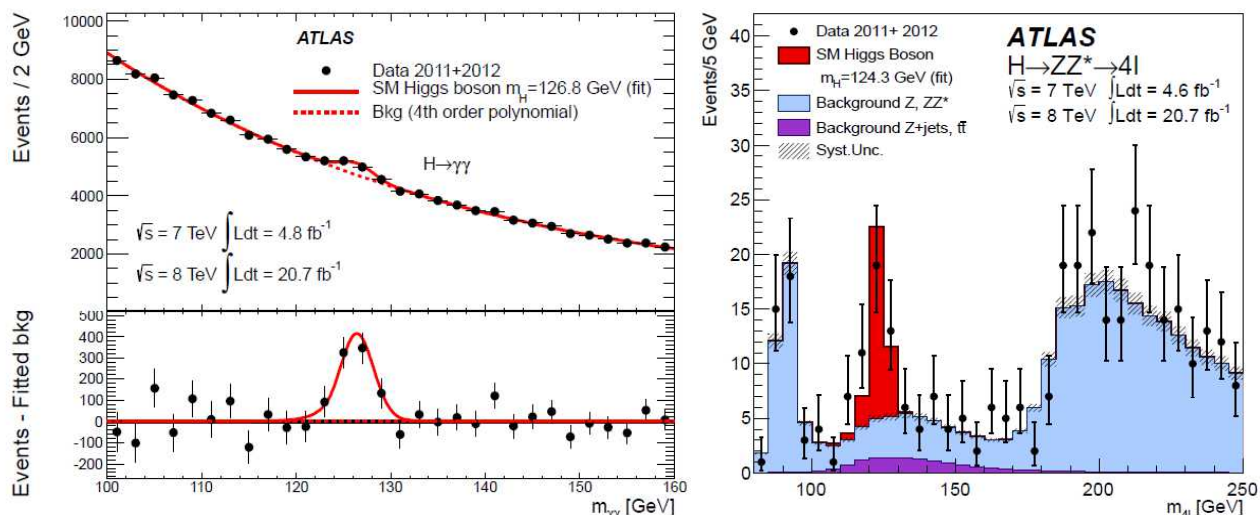


Рисунок 133 Слева: статистика двухфотонных распадов бозона Хиггса. Справа: статистика четырёхлептонных распадов бозона Хиггса. Из [145].

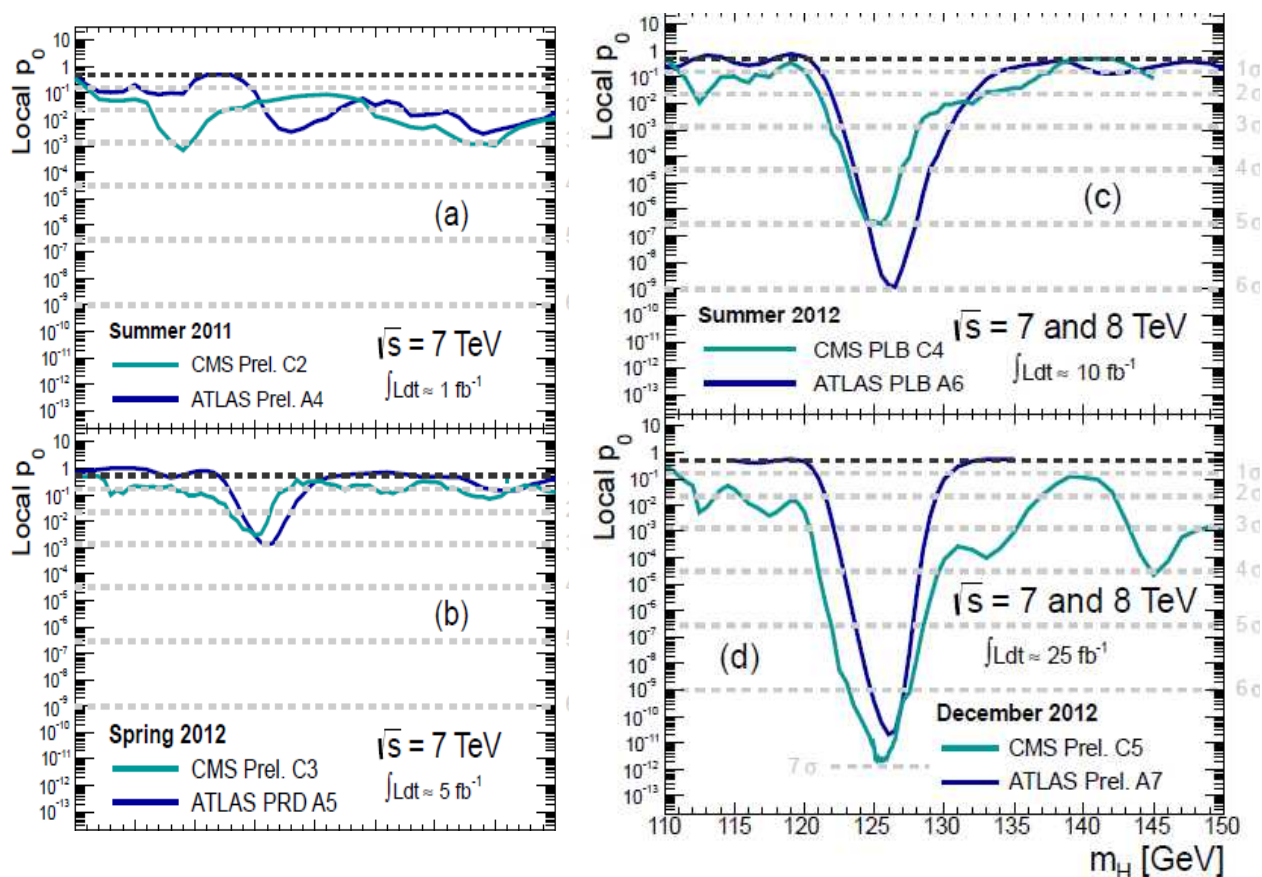


Рисунок 134 Накопление статистики распадов бозона Хиггса по мере развития экспериментов на Большом адронном коллайдере в лета 2011 по декабрь 2012 года. Из [145].

Лептоны.

В семейство лептонов входят электрон, мюон, тау-лептон, электронное, мюонное и тау-нейтрино, а также их античастицы. По некоторым теориям нейтрино могут быть истинно нейтральными (то есть совпадать с антинейтрино), эта гипотеза проверяется в поиске безнейтринного двойного бета-распада (см. стр. 81). Частицы лептонного семейства взаимодействуют только через электромагнитное, слабое и гравитационное взаимодействия, а также могут взаимодействовать с хиггсовским бозоном.

Все лептоны являются фермионами со спином $1/2$, спин нейтрино связан с направлением движения нейтрино: он направлен против движения для нейтрино и по движению для антинейтрино. С лептонами связывают квантовое число L — лептонный заряд, а иногда вводят индивидуальные лептонные числа по поколениям (для электрона, мюона и тау). Однако закон сохранения как для индивидуальных, так и для общего лептонного числа верен лишь приближённо.

Согласно «Стандартной модели» нейтрино являются безмассовыми частицами, но наблюдение эффекта осцилляций нейтрино (превращения одних нейтрино в другие) указывает на наличие некоторой малой массы. Современные эксперименты пока установили оценки сверху для масс нейтрино.

Электрон является стабильной частицей, мюон и тау-лептон распадаются. Мюон с периодом полураспада 2.2 мсек в электрон и пару нейтрино: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$, тау-лептон со средним периодом полураспада $2.9 \cdot 10^{-13}$ сек по многим каналам, включающим, например, образование мюона и пары нейтрино, либо мезона и тау-нейтрино.

Характеристики лептонов представлены в таблице ниже:

Частица/ античастица	Символ	Q	Спин S	L_e	L_μ	L_τ	Масса, МэВ	Время жизни, сек.
Электрон / позитрон	e^-/e^+	-1/+1	1/2	+1/-1	0	0	0.511	стабилен
мюон/ антимюон	μ^-/μ^+	-1/+1	1/2	0	+1/-1	0	106	$2.20 \cdot 10^{-6}$
тау/антиау	τ^-/τ^+	-1/+1	1/2	0	0	+1/-1	1777	$2.91 \cdot 10^{-13}$
электронное нейтрино/ электронное антинейтрино	$\nu_e/\bar{\nu}_e$	0	1/2	+1/-1	0	0	$<2.2 \cdot 10^{-6}$	
мюонное нейтрино/ мюонное антинейтрино	$\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$	0	1/2	0	+1/-1	0	<0.17	
тау нейтрино/ тау антинейтрино	$\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$	0	1/2	0	0	+1/-1	<15.5	

Кварки.

Экспериментально было установлено, что даже такая «простая» частица как нейтрон «непроста»: у электрически нейтрального нейтрона есть свой магнитный момент, нейтрон не совпадает со своей античастицей. Кроме того, были обнаружены многочисленные взаимные превращения тяжёлых частиц друг в друга, формирование групп частиц с похожими свойствами.

На основе анализа этих данных в 1964 году Дж.Цвейг и М.Гелл-Ман (Гелл-Ман является лауреатом Нобелевской премии 1969 года) предположили существование составной структуры адронов. В этой модели свойства различных тяжёлых частиц объяснялись комбинацией свойств составляющих их элементов — кварков.

Термин «кварк» не имеет специального смысла (хотя и совпадает по первым буквам и в русском и в английском языках со словом «квант»). Название было заимствовано Гелл-Маном из романа Джойса «Поминки по Финнегану», герою которого снилась бессмысленная фраза: «Три кварка для доктора Марка».

По современным представлениям кварки не существуют как свободные частицы: сила взаимодействия кварков друг с другом возрастает неограниченно при попытке разнести их. Из анализа свойств различных частиц установлено существование 6 типов кварков. Их свойства перечислены в таблице ниже. Отметим сразу, что понятие массы для кварков определено несколько условно, так как масса имеет смысл только как масса покоя изолированной частицы, массы тяжёлых кварков определены пока с достаточно большим разбросом, в литературе могут встречаться и другие значения по сравнению с указанными в таблице.

Название	Символ	Масса, МэВ ¹	Заряды и ароматы					
			Q	B	S	C	b	t
верхний	u	2.01±0.14	+2/3	1/3	0	0	0	0
нижний	d	4.79±0.16	-1/3	1/3	0	0	0	0
странный	s	101	-1/3	1/3	-1	0	0	0
очарованный	c	1270	+2/3	1/3	0	+1	0	0
красивый (прелестный)	b	4190-4670	-1/3	1/3	0	0	-1	0
правдивый (истинный)	t	172000	+2/3	1/3	0	0	0	+1

Помимо этих характеристик у кварков есть дополнительный «цветовой заряд», обеспечивающий обмен глюонами. Цвет конкретного кварка в составной частице не важен, важно лишь чтобы частица в целом была бесцветной.

Составные частицы

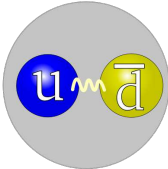
Из кварков могут быть составлены все тяжёлые частицы — адроны. По составу их подразделяют на барионы (состоящие из трёх кварков) и мезоны (из двух кварков). С учётом требования отсутствия полного «цветового заряда» у составной частицы, в барионе должны присутствовать все три цвета либо все три антицвета, а в мезоне — пары цвет-антицвет.

В массу частиц большой вклад дают взаимодействия кварков. Например π -мезон и ρ -мезон

¹ для верхнего и нижнего кварков по [146], для остальных кварков по [147]

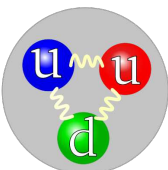
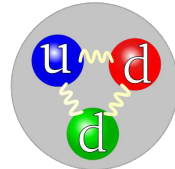
имеют одинаковый кварковый состав, но их массы составляют около 140 и 770 МэВ, соответственно.

Ниже в таблице приведены кварковые структуры некоторых барионов и мезонов:

Частица	Масса, МэВ	Спин	Q	I ₃	Состав (рисунки с соответствующих страниц wikipedia.org)
π^+	139.6	0	+1	+1	 $u \bar{d}$
π^0	135.0	0	0	0	$\frac{(u \bar{u} - d \bar{d})}{\sqrt{2}}$
π^-	139.6	0	-1	-1	$\bar{u} d$
K^+	494	0	+1	1/2	$u \bar{s}$
K^0	498	0	0	-1/2	$d \bar{s}^1$
K^-	494	0	-1	-1/2	$\bar{u} s$
ρ^+	775	1	+1	1	$u \bar{d}$
ρ^0	775	1	0	0	$\frac{(u \bar{u} - d \bar{d})}{\sqrt{2}}$
ρ^-	775	1	-1	-1	$\bar{u} d$

Кроме этого теоретически возможно существование и частиц из большего числа кварков: тетракварков и пентакварков. Требование «цветовой нейтральности» означает, что в тетракварке должно быть две пары кварк-антикварк, а в пентакварке должны быть представлены все три цвета и одна пара цвет-антицвет, то есть должно содержаться 4 кварка и один антикварк. Тетракварк имеет нулевой барионный заряд и формально является мезоном, пентакварк имеет барионный заряд равный 1 и является барионом. Несколько кандидатов в такие экзотические тяжёлые частицы было недавно открыто в ускорительных экспериментах на Большом адронном коллайдере и электрон-позитронных коллайдерах в Пекине (Китай) и Цукубе (Япония). Обнаруженный тетракварк с кварковым составом $c \bar{c} d \bar{u}$ имеет массу около 4500 МэВ [148], другой кандидат в тетракварки (частица $Z_c(3900)$) с ещё не установленным точно составом имеет массу около 3900 МэВ [149], обнаруженный пентакварк с кварковым составом $u u d c \bar{c}$ имеет массу около 4400 МэВ [150], [151].

1 K^0 не является истинно нейтральным, у него есть античастица $\bar{K}^0$ с кварковым составом $\bar{d} s$, в эксперименте проявляются симметричная долгоживущая и антисимметричная короткоживущая комбинации частицы и античастицы: $K_L^0 = \frac{d \bar{s} + \bar{d} s}{\sqrt{2}}$ и $K_S^0 = \frac{d \bar{s} - \bar{d} s}{\sqrt{2}}$.

Частица	Масса, МэВ	Спин	Q	I ₃	Состав (рисунки с соответствующих страниц wikipedia.org)
p	938.2	1/2	+1	+1/2	 <i>uud</i>
n	939.6	1/2	0	-1/2	 <i>udd</i>
Λ^0	1116	1/2	0	0	<i>uds</i>
Σ^+	1189	1/2	+1	1	<i>uus</i>
Σ^0	1193	1/2	-1	0	<i>uds</i>
Σ^-	1197	1/2	0	-1	<i>dds</i>
Σ_c^{++}	2454	1/2	+2	1	<i>uuc</i>
Δ^{++}	1232	3/2	+2	3/2	<i>uuu</i>
Δ^-	1232	3/2	-1	-3/2	<i>ddd</i>
Ξ^-	1322	1/2	-1	-1/2	<i>dss</i>
Ξ^0	1315	1/2	0	1/2	<i>uss</i>
Ω^-	1672	3/2	-1	0	<i>sss</i>
J/Ψ	3097	1	0	0	<i>c c̄</i>

Лекция 5. Экспериментальные методы ядерной физики.

Детектирование частиц.

Счётчик Гейгера.

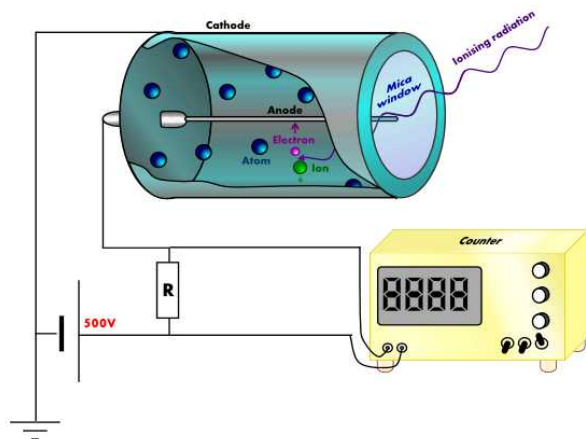


Рисунок 135: Схема устройства счётчика Гейгера. С сайта [152]



Рисунок 136: Современный счётчик Гейгера. С сайта [152].

Всем известный счётчик Гейгера был изобретён сотрудником Резерфорда Хансом Гейгером в 1908 году (доработан Вальтером Мюллером в 1928 году) [152].

Счётчик представляет собой трубку, наполненную газом при давлении ~ 0.1 атм с центральным электродом в форме тонкой проволоочки (вторым электродом является стенка трубки). На электроды трубки прикладывается разность потенциалов от нескольких сотен вольт до примерно одного киловольта. На трубке обычно делается окно из прозрачного для детектируемого излучения материала.

При попадании внутрь трубки ионизирующего излучения (в основном гамма и бета) происходит ионизация газа. Под действием приложенного напряжения образовавшиеся при ионизации электроны и ионы притягиваются к соответствующим электродам, положительным электродом (анодом) является в стандартном счётчике тонкая проволоочка. Вблизи тонкой проволоочки электрическое поле сильно возрастает (поле равномерно заряженной длинной нити $E \propto \frac{1}{r}$), под действием этого поля электроны ускоряются и успевают набирать энергию, достаточную для ионизации других атомов при столкновении — рождается электронная лавина. Эта лавина, вызванная изначально единственной частицей ионизирующего излучения, создаёт заметный импульс электрического тока между электродами, который и детектируется. Количество таких импульсов пропорционально интенсивности излучения. Для выделения определённых видов излучения (например, блокирования бета-излучения) окно счётчика может закрываться соответствующими поглощающими экранами.

Счётчик Гейгера прост в изготовлении и использовании, поэтому он широко распространён в технике (включая военную и технику гражданской обороны). В физических применениях использование счётчика Гейгера ограничено, так как он не позволяет более точно определить свойства излучения.

Детекторы нейтронов.

Нейтроны активно используются в физических исследованиях: нейтронная дифракция является одним из наиболее сильных экспериментальных методов физики конденсированного состояния, поэтому детектирование нейтронов представляет отдельную важную проблему. Так как нейтрон — нейтральная частица, его ионизирующее действие мало, и он не вызывает отклика ни у счётчика Гейгера, ни в камере Вильсона.

Для детектирования нейтронов обычно используется их взаимодействие с другими ядрами, приводящее к образованию ионизованных ядер, которые в свою очередь можно обнаружить обычными методами. Наиболее практичными являются две реакции: ${}^3_2\text{He} + {}^1_0n \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$ и ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0n \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$.

Технически для детектирования изготавливается ионизационная камера, похожая на счётчик Гейгера, которая либо заполняется гелием-3 или трифторидом бора-10 (BF_3), либо стенки камеры покрываются слоем бора-10.

Для задач нейтронной дифракции важным является обнаружение пространственного положения рассеянного нейтрона, поэтому детектор либо делается подвижным, либо делается многоэлектродный детектор большого размера, контролирующий одновременно большой угол рассеяния (см., например, [153]).

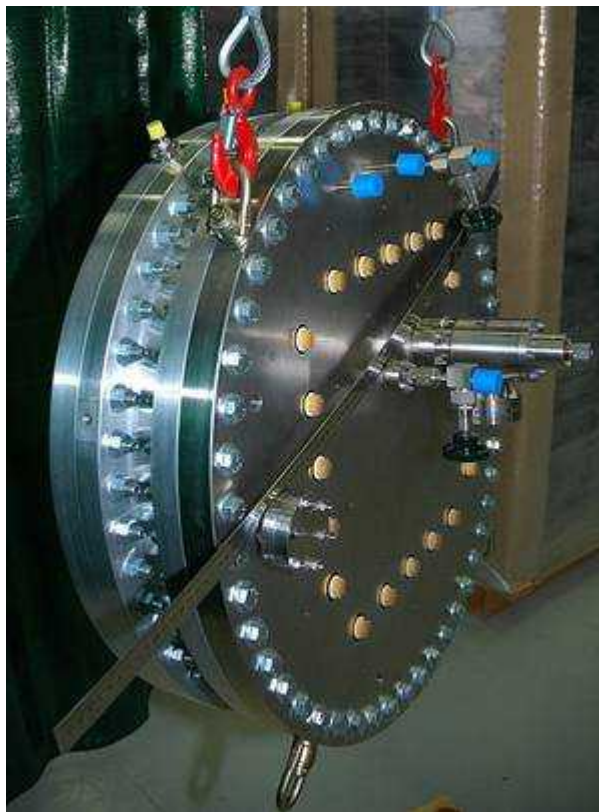


Рисунок 137: Детектор нейтронов MILAND Института Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция). Точность определения положения нейтрона 1мм. С сайта [153].

Камера Вильсона.

Первым из приборов, позволившим «увидеть» траекторию движения элементарной частицы (трек частицы) была камера Вильсона, изобретённая шотландским физиком Чарльзом Вильсоном в 1911 году [154]. Демонстрационные камеры Вильсона можно встретить в университетах и даже в школах [155]. В первоначальной версии камеры Вильсона создавалась атмосфера насыщенного водяного пара, после чего за счёт адиабатического расширения воздух в камере охлаждался и начиналась конденсация. При пролёте заряженной частицы её взаимодействие с паром приводило к образованию центров конденсации и капли показывали путь частицы. За своё изобретение Вильсон стал лауреатом Нобелевской премии по физике в 1927 году.



Рисунок 139: Демонстрационная диффузионная камера Вильсона. Источник частиц находится на конце изогнутого держателя слева, виден «веер» расходящихся от источника треков. С сайта [155].



Рисунок 138: Сделанная Ч.Вильсоном камера Вильсона. Из экспозиции музея Кавендишской лаборатории. С сайта [154].

Недостатком камеры Вильсона в её первоначальной версии был импульсный характер работы — спустя некоторое время необходимо заново создавать атмосферу насыщенного пара и производить цикл адиабатического расширения для начала конденсации. Диффузионная разновидность камеры Вильсона (изобретена А.Лангсдорфом в 1939) лишена этого недостатка. В этой камере нижняя стенка охлаждается (часто с использованием сухого льда), так что вблизи неё условие конденсации поддерживается непрерывно, но новые молекулы конденсирующейся жидкости (обычно различные спирты) попадают в холодную область только за счёт диффузии.

В 1923 году работающий в лаборатории Резерфорда П.Л.Капица впервые поместил камеру Вильсона во внешнее магнитное поле и наблюдал искривление траекторий движения альфа-частиц. Этот метод в дальнейшем стал одним из главных методов идентификации частиц, так как радиус траектории в заданном поле определяется скоростью частиц и их удельным зарядом:

$$m \frac{V^2}{R} = qVB$$
$$R = \frac{mV}{qB}$$

С введением в практику фотографирования треков (следов частиц) камера Вильсона стала на долгое время самым главным инструментом ядерной физики (см. [156] для примеров первых фотографий треков частиц). В ней были обнаружены космические лучи, открыты позитрон, мюон, пи-мезон.

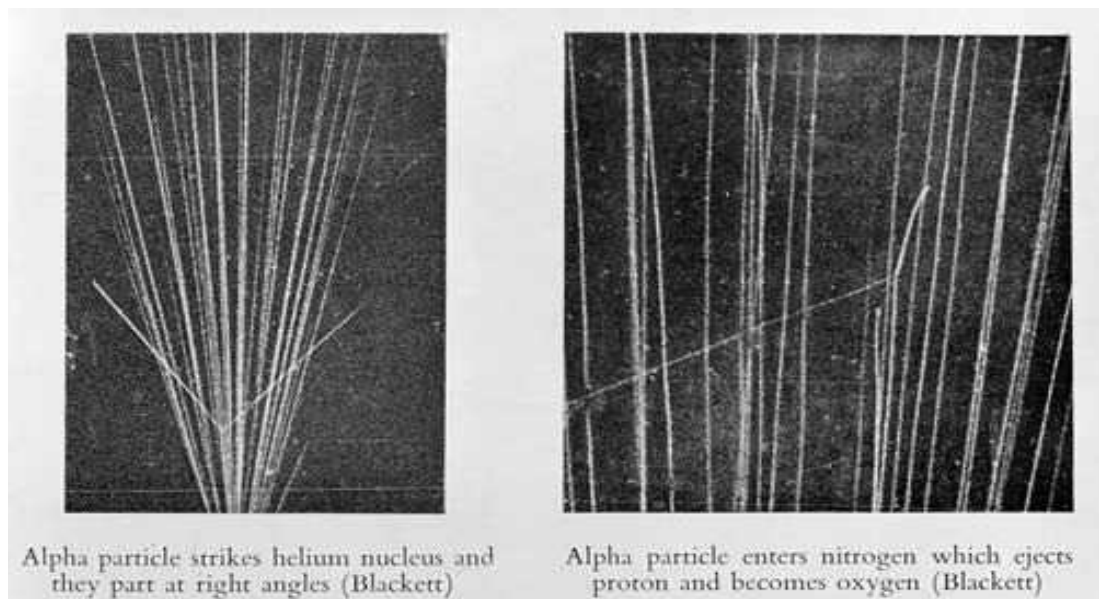


Рисунок 140: Ранние фотографии в камере Вильсона (получены Блэккеттом). Слева: рассеяние альфа-частицы на атоме гелия, угол 90° после столкновения свидетельствует о равенстве масс альфа частицы и атома гелия. Справа: взаимодействие альфа-частицы с ядром азота с образованием ядра кислорода и протона. С сайта [156]

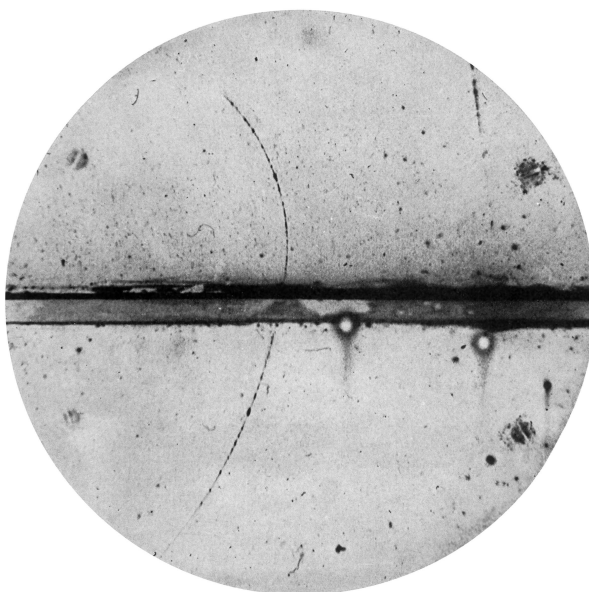


Рисунок 141: Трек первого достоверно обнаруженного позитрона в камере Вильсона (К.Андерсон). В центре кадра свинцовая пластина, большая кривизна трека в верхней части показывает, что позитрон прилетел снизу. Из [134].

Пузырьковая камера.

Пузырьковая камера была изобретена Дональдом Глэйзером в 1952 году, за это изобретение он был удостоен Нобелевской премии 1960 года. Принцип работы пузырьковой камеры похож на принцип работы камеры Вильсона, только вместо переохлаждённого пара используется перегретая жидкость. Заряженные частицы вызывают парообразование и по следу пузырьков можно восстановить траекторию частицы.

Пузырьковые камеры стали необходимы с ростом энергии исследуемых частиц: энергичные частицы слишком медленно теряли энергию во взаимодействии с паром в камере Вильсона, что требовало увеличения размеров камеры. Недостатком пузырьковой камеры является импульсный характер её работы. Перегрев жидкости достигается сбросом давления, после чего через некоторое время начинается обычное кипение. В качестве перегретой жидкости используются криогенные жидкости, обычно водород или неон-водородная смесь, в камере Гаргамель в ЦЕРН (рисунок 142) использовался тяжёлый фреон CF_3Br для увеличения взаимодействия с нейтрино и усиления разрешающей способности (обнаружение отличий мюона от пиона) [157].

В пузырьковых камерах было получено также много новых данных. В частности, в пузырьковой камере Гаргамель (Gargamel) (ЦЕРН, 1970-1978) были открыты слабые нейтральные токи, доказавшие существование Z-бозона. В пузырьковой камере впервые были обнаружены многие элементарные частицы, например Ω^- (рисунок 143) [158].

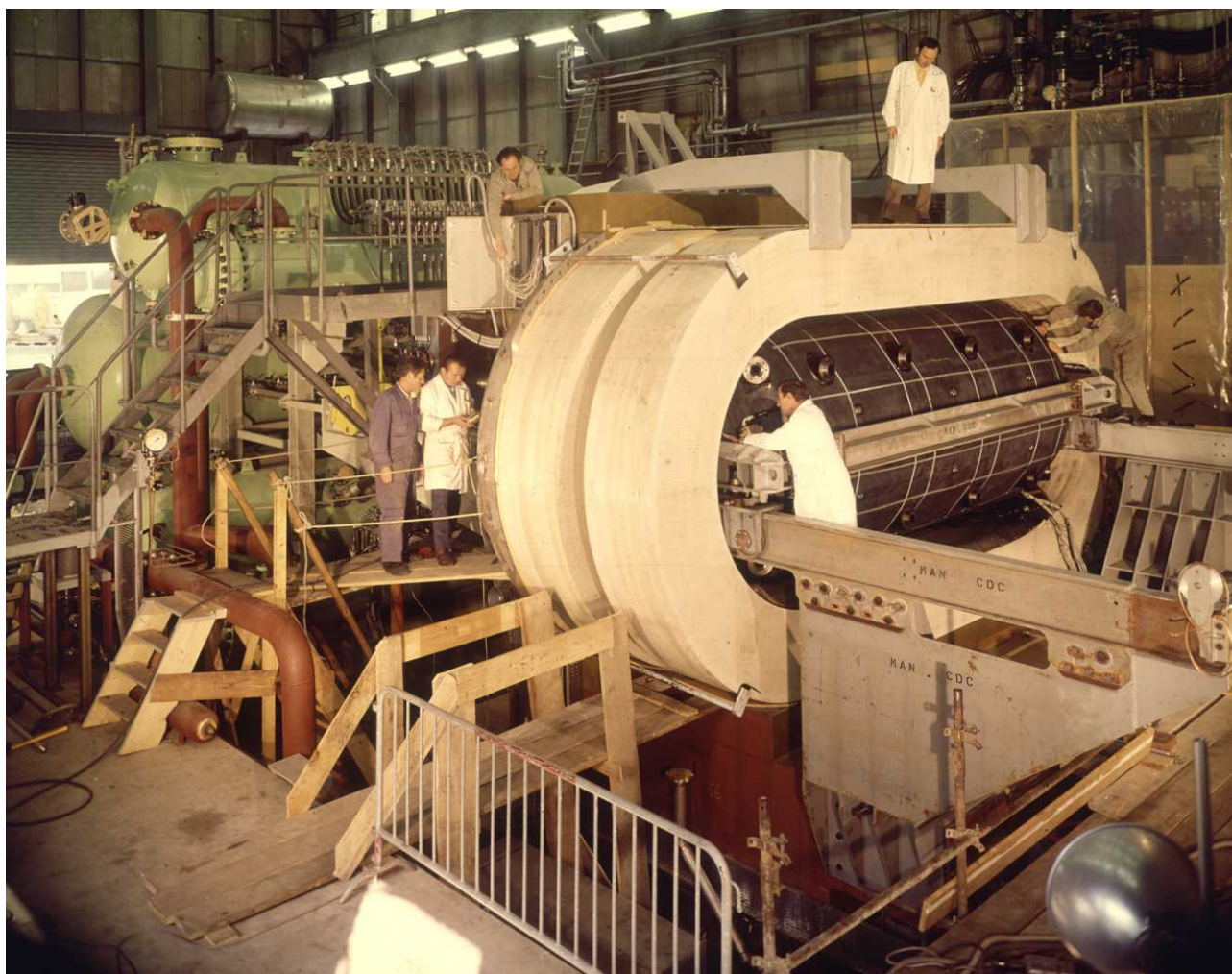


Рисунок 142: Пузырьковая камера Гаргамель (ЦЕРН). С сайта [157].

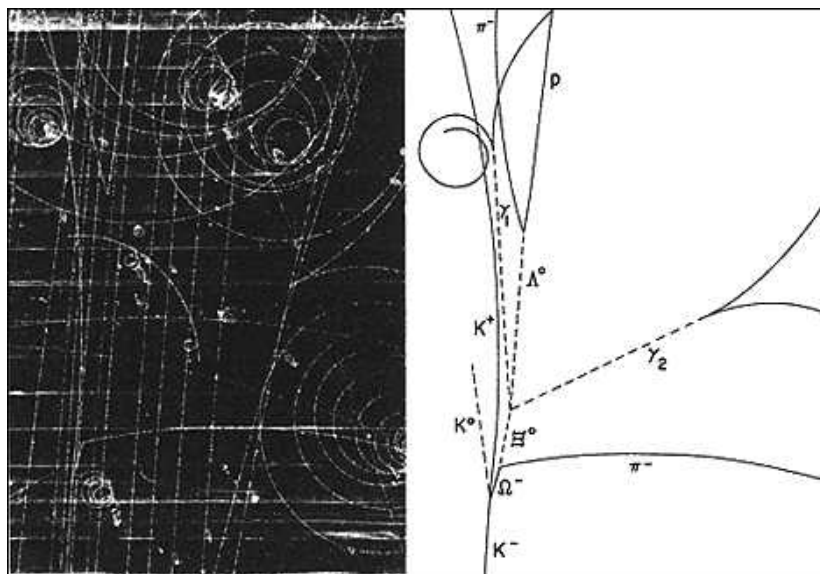


Рисунок 143: Первое изображение омега-минус мезона в пузырьковой камере. Слева: фотография, справа: расшифровка. пунктирные линии на расшифровке соответствуют невидимым трекам нейтральных частиц. С сайта [158].

Искровые и многопроволочные (многопроволочные пропорциональные) камеры.

Оба этих типа детекторов являются идеологически родственными счётчику Гейгера. В искровой камере частица пролетает через набор параллельных электродов, пространство между которыми заполнено газом (рисунок 144) [159]. К электродам прикладывается напряжение, близкое к пробойному, при ионизации газа возникает искра, которую можно зафиксировать на фотопластинке. Искровые камеры использовались с 30-х до 60-х годов. При помощи искровой камеры были зафиксированы мюонные нейтрино (Нобелевская премия 1988 года, рисунок 145).

Многопроволочная камера — это по сути дела счётчик Гейгера со множеством анодов. Определяя на какой из анодов произошёл разряд можно проследить путь частицы. Эта камера позволяет лёгкую интеграцию с электроникой и компьютерной техникой. За разработку и развитие многопроволочной камеры Георг Шарпак был удостоен Нобелевской премии 1992 года.



Рисунок 144: М.Шварц на фоне модулей искровой камеры. С сайта [159].

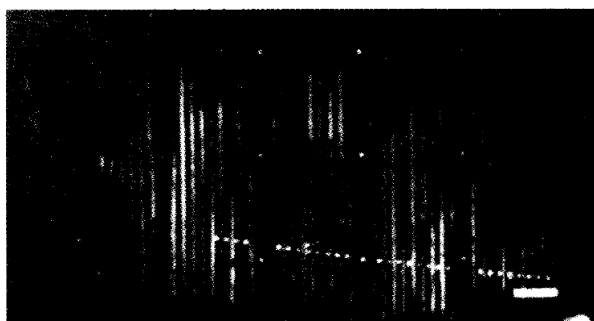


Рисунок 145: Возникновение мюона в искровой камере (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Из Нобелевской лекции Шварца [6].

Метод фотографических эмульсий.

Этот метод является развитием самого первого метода детектирования радиации — ещё в опытах Беккереля было обнаружено взаимодействие радиации с чувствительной эмульсией фотопластинки. Для детектирования трека частицы оказалось необходимо создать фотопластинки с толстыми слоями эмульсии, так чтобы при дальнейшем анализе можно было проследить пути и распады частиц. В развитие метода внесли вклад советские физики Л.В.Мысовский и А.Д.Жданов. В работах Нобелевского лауреата С.Пауэла также применялись фотоэмульсии для обнаружения и анализа частиц космического излучения (рисунки 146, 147).

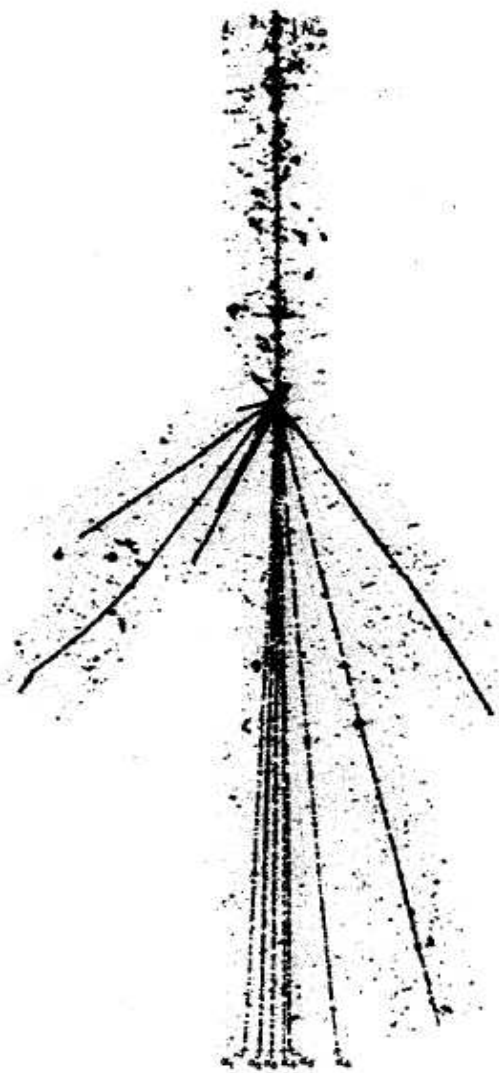


Рисунок 146: Результат столкновения ядра магния или алюминия из космического излучения с ядром фотоэмульсии с образованием лёгких ядер (включая 6 альфа-частиц). Изображение получено на фотоэмульсии. Из нобелевской лекции С.Пауэла [6].

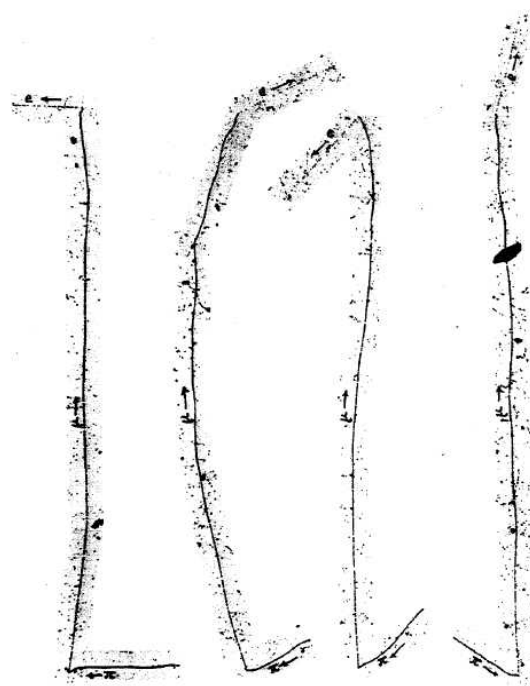


Рисунок 147: Следы последовательного распада пи-мезона в мюон и электрон. Изображение получено на фотоэмульсии. Из нобелевской лекции С.Пауэла [6].

Детекторы нейтрино.

Детектирование нейтрино представляет сложность ввиду слабости их взаимодействия с веществом. Возможно два канала взаимодействия: нейтральный и заряженный.

В нейтральном канале происходит просто «механическое» рассеяние нейтрино с частицей: нейтрино обменивается с частицей Z-бозоном и передаёт ей некоторую энергию, при этом никаких превращений частиц не происходит. Если частица-мишень лёгкая (электрон), то она может получить энергию достаточную для движения со скоростью больше скорости света в среде, что может быть обнаружено по характерному черенковскому излучению. По нейтральному каналу могут взаимодействовать все нейтрино.

В заряженном канале происходит обмен W-бозонами, нейтрино уничтожается в процессе взаимодействия, образуется лептон и протон превращается в нейтрон или наоборот. Этот процесс может быть обнаружен либо по появлению заряженного лептона, либо по превращению одних элементов в другие. Для такого взаимодействия нейтрино должно иметь достаточную энергию (необходимо рождение соответствующего лептона), поэтому оно с разной эффективностью проявляется для электронных, мюонных и тау-нейтрино.

Для экранировки от космического излучения и других фоновых сигналов детекторы нейтрино обычно размещают в подземных шахтах.

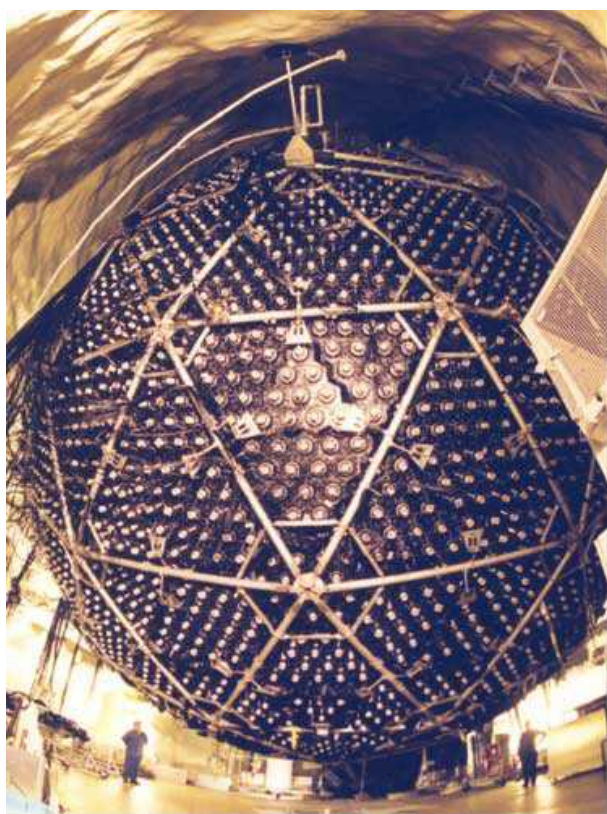


Рисунок 148: Детектор нейтрино Нейтринной обсерватории Садбэри (Канада). С сайта [160].

С детекторами нейтрино исторически связана «проблема солнечных нейтрино». При первых опытах (Р.Дэвис и Дж.Бэхкалл, конец 60-х) использовалось детектирование по заряженному каналу. В качестве детектора выступала 380 м³ цистерна, заполненная тетрахлорэтиленом C_2Cl_4 , расположенная в шахте на глубине почти 1500 метров. Искомыми событиями было превращение одного нейтрона в атоме хлора в протон с образованием радиоактивного изотопа аргона, который собирался, выделялся и количество которого подсчитывалось.¹ Эти опыты обнаружили наличие солнечных нейтрино, однако их количество составило примерно 1/3 от ожидаемого по излучаемой Солнцем энергии. Как показали дальнейшие опыты, эта нехватка нейтрино была связана с эффектом нейтринных осцилляций — за время следования от Солнца до Земли часть электронных нейтрино превращается в мюонные и тау-нейтрино, для которых заряженный канал взаимодействия в детекторе запрещён требованием иметь достаточно энергии для рождения массивного лептона (у солнечных нейтрино недостаточно энергии для этого). Проблема солнечных нейтрино была решена с

введением в строй Нейтринной обсерватории в Садбэри (Канада) [160], где в качестве

¹ Подробное описание этого красивого эксперимента есть в литературе. Отметим здесь, что для успешного проведения опыта необходимо было детектировать буквально образование считанных атомов аргона в нескольких тоннах хлорсодержащего детектора. Как ни удивительно, это удалось сделать!

детектора использовался объём с 1000 тонн тяжёлой воды (рисунок 148), в котором фиксировались взаимодействия нейтрино всех типов по нейтральному каналу и дополнительно взаимодействие электронных нейтрино по заряженному каналу.

Источники нейтронов для физических экспериментов.

В качестве примера экспериментальных установок, связанных с ядерной физикой рассмотрим сначала источники нейтронов для физических исследований. Нейтроны используются в исследованиях по дифракции нейтронов в различных кристаллах, позволяющих изучить различные свойства кристаллов (в частности, так как у нейтрона есть магнитный момент — магнитные свойства), кроме этого большая проникающая способность нейтральных нейтронов позволяет использовать их в дефектоскопии, рассматриваются медицинские применения (нейтронная лучевая терапия), радиационный анализ образцов в геологии (при облучении нейтронами образуются нестабильные изотопы по характерному излучению которых можно установить наличие некоторых (обычно тяжёлых) элементов). Сильное поглощение нейтронов в нормальном водороде позволяет использовать нейтронное облучение для обнаружения органических тканей (что невозможно, например, при помощи рентгеновского излучения, слабо рассеиваемого лёгкими атомами).

Общими проблемами для всех нейтронных экспериментов является трудность управления потоком нейтронов — его можно контролируемо отклонить только за счёт дифракции, любое ограничение пучка нейтронов по углу расхождения или энергии сводится к поглощению «нежелательных» нейтронов. Поэтому на пути от источника до детектора интенсивность пучка уменьшается на несколько порядков и, таким образом, стартовая интенсивность пучка нейтронов является важнейшей характеристикой источника. Кроме этого, так как нейтроны образуются в ходе ядерных реакций с довольно большой энергией для их «охлаждения» (и соответственного увеличения дебройлевской длины волны, важной для дифракционного эксперимента) приходится применять различные замедлители (обычно тяжёлая вода), находящиеся при комнатной температуре (для получения «тепловых нейтронов»), а иногда и при криогенной температуре (жидкий дейтерий, для получения «холодных» и «ультрахолодных» нейтронов).

Помимо самого источника нейтронов (это обычно реактор, непосредственно производящий нейтроны, или ускоритель протонов, бомбардирующий мишень, в которой образуются нейтроны) для проведения эксперимента нужно большое количество специализированного оборудования (детекторы, монохроматоры, криостаты, магниты). Также необходимо соблюдение определённых мер радиационной безопасности и контроля.

Поэтому современные источники нейтронов являются как правило специализированными центрами, часто международными, в которых большая часть исследований производится не штатными сотрудниками, а приезжающими специалистами со всего мира [161]. Такая форма организации «науки больших установок» типична для современного мира. В институтах, обладающих такими установками, проводятся несколько раз в год конкурсы для проведения исследований. Поддержанным проектам на некоторое время (обычно это несколько дней для нейтронных экспериментов) выделяется одна из установок («beamline», «линия») и за отведённое время приехавшие учёные при технической помощи местных специалистов стараются выполнить свою программу исследований.

Рассмотрим подробнее два таких международных центра по нейтронным исследованиям: Институт Лауэ-Ланжевена в Гренобле (Франция) [109] и Институт Поля Шерера в Виллигене (Швейцария) [162], являющихся признанными лидерами в нейтронной физике.

Институт Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция).



Рисунок 149: Здание Института Лауэ-Ланжевена в Гренобле (Франция). Цилиндрическое строение справа - реакторный корпус. С сайта [109].

Институт Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ, ILL) был основан в 1967 году совместно Францией и ФРГ. Реактор был введён в рабочий режим в конце 1971 года. В дальнейшем к проекту присоединилась Великобритания как полноправный партнёр и 12 стран (Испания, Швейцария, Австрия, Италия, Чехия, Швеция, Венгрия, Бельгия, Польша, Словакия и Индия). Россия сотрудничала с ИЛЛ в поставке топлива для реактора. В ИЛЛ около 500 постоянных сотрудников, ежегодно в Институт приезжает около 1000 учёных для проведения экспериментов, бюджет 2011 года составил 88 миллионов евро.

Сердцем ИЛЛ является реактор с высоким потоком нейтронов (High Flux Reactor), в котором достигнута одна из самых больших плотностей пучка $1.5 \cdot 10^{15} 1/(см^2 сек)$, тепловая мощность реактора составляет всего 53.8 МВт.¹ В реакторном зале (рисунок 150) вокруг реактора расположено несколько линий, по которым из активной зоны выводятся пучки нейтронов. На этих линиях установлены различные приборы для физических исследований.

Типичная схема нейтронного дифрактометра представлена на рисунке 152, фотографии фрагментов реальных приборов показаны на рисунках 151, 153, 154. Пучок нейтронов из активной зоны реактора распространяется по экранированному нейтроноводу. На пути пучка ставится кристалл монохроматора, который поворачивается таким образом, чтобы в желаемом направлении происходило рассеяние пучка с нужной в эксперименте длиной волны. Все остальные нейтроны поглощаются в защитных стенах. Далее пучок коллимируется (обычно либо пропусканием через набор диафрагм, либо через набор параллельных пучку тонких поглощающих пластин) и попадает на образец. Рассеянный

¹ При этом вся эта мощность отводится с охлаждающей жидкостью в протекающую мимо реку Изер: активная зона реактора ИЛЛ поддерживается при температуре 30 °С и получение энергии не является даже побочной целью этого реактора. Можно отметить, что оптимизация такого исследовательского реактора идёт в совершенно противоположном направлении, по сравнению с энергетическим реактором. В энергетическом реакторе желательно использование каждого нейтрона для продолжения цепной реакции и желателен максимальный КПД при преобразовании выделяющегося в цепной реакции тепла. Это приводит к большому размеру реактора с распределённой активной зоной (относительные потери нейтронов через внешнюю оболочку реактора убывают с ростом размера) и требует горячей активной зоны для нагрева пара в контурах парогенераторов до большой температуры в соответствии с известными из термодинамики ограничениями на КПД. В исследовательском реакторе для производства нейтронов наоборот «результатом работы» являются теряемые реактором нейтроны. В результате получается компактная активная зона, которую нет смысла делать горячей.

пучок попадает на ещё один монохроматор (анализатор), который позволяет выделить нейтроны с определённой энергией. Эти, окончательно выделенные нейтроны подсчитываются детектором. Для нейтронного эксперимента достаточно типично измерение миллионов и даже тысяч нейтронов в секунду — остальные из примерно 10^{15} нейтронов поглощаются на различных этапах отбора и рассеяния нейтронов.



Рисунок 150: Реакторный зал ИЛЛ (Гренобль, Франция). С сайта [108].

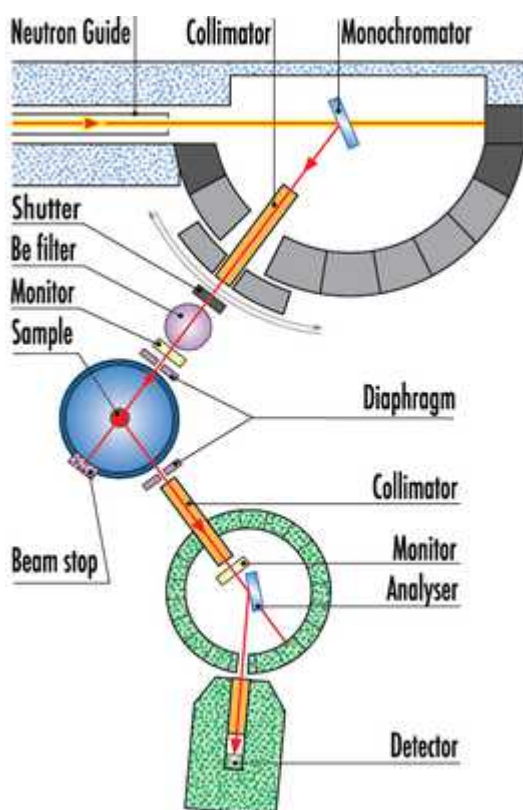


Рисунок 152: Схема трёхосного дифрактометра IN12 в Институте Лауэ-Ланжевена. С сайта [109].

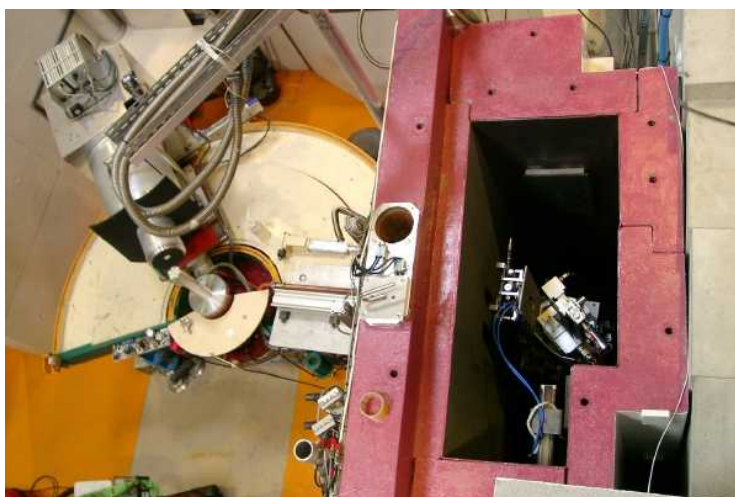


Рисунок 151: Дифрактометр D16 (ИЛЛ, Гренобль, Франция). Справа (в окрашенном красным каземате) — выход нейтроновода и монохроматор. С сайта [109].



Рисунок 154: Выход нейтроновода к дифрактометру D16 (ИЛЛ, Гренобль, Франция). С сайта [109].



Рисунок 153: Монохроматор из пиролитического графита с дифрактометра D16 (ИЛЛ, Гренобль, Франция). С сайта [109].

Институт Поля Шерера (Виллиген, Швейцария).



Рисунок 155: Институт Поля Шерера (Виллиген, Швейцария). На ближнем плане круглое здание синхротрона (строящийся источник синхротронного излучения) и импульсный источник нейтронов (большое прямоугольное здание). С сайта [162].

Институт Поля Шерера (PSI) расположен между Цюрихом и Базелем, в небольшом городке Виллиген в Швейцарии. Институт был организован в 1988 году путём слияния нескольких более старых научных институтов. Ускоритель протонов работает с 1974 года. В Институте проводятся исследования в широком диапазоне научных задач от физики до биологии. Физические задачи во многом собраны вокруг импульсного источника частиц.

В отличие от реактора ИЛЛ, в Институте Поля Шерера источником частиц является ускоритель протонов — протонный циклотрон с энергией на выходе 590 МэВ. Перед попаданием в циклотрон протоны предварительно ускоряются в линейном ускорителе Кокрофта-Валтона и в малом циклотроне-инжекторе.

Протоны бомбардируют мишени, в которых рождаются новые частицы. На пути пучка помещают сначала углеродную мишень, в которой при реакции энергичных протонов с ядрами углерода образуются пи-мезоны, которые в свою очередь распадаются через 26 нсек с образованием мюонов. Эти мюоны также используются в некоторых экспериментах.

После прохождения углеродной мишени, пучок протонов попадает на свинцовую мишень. При попадании энергичного протона в ядро свинца из последнего выбивается («выкалывается») от 10 до 20 нейтронов. Эти нейтроны охлаждаются в тяжеловодном замедлителе (а для получения ультрахолодных нейтронов — в криогенном танке с тяжёлым водородом), после чего попадают в нейтроноводы, ведущие к различным экспериментальным установкам. Средний поток нейтронов составляет $10^{14} 1/(см^2 сек)$ и сопоставим с нейтронным потоком в ИЛЛ.



Рисунок 156: Ускоритель Кокрофта-Валтона, первая стадия протонного ускорителя Института Поля Шерера. С сайта [162].



Рисунок 157: Протонный циклотрон Института Поля Шерера, последняя стадия ускорителя протонов. За 186 оборотов в циклотроне протоны разгоняются до 80% скорости света (590 МэВ кинетической энергии). Кожухи магнитов окрашены в голубоватый цвет. С сайта [162].



Рисунок 158: Вращающаяся углеродная мишень для мюонного генератора Института Поля Шерерра (Виллиген, Швейцария). С сайта [162].

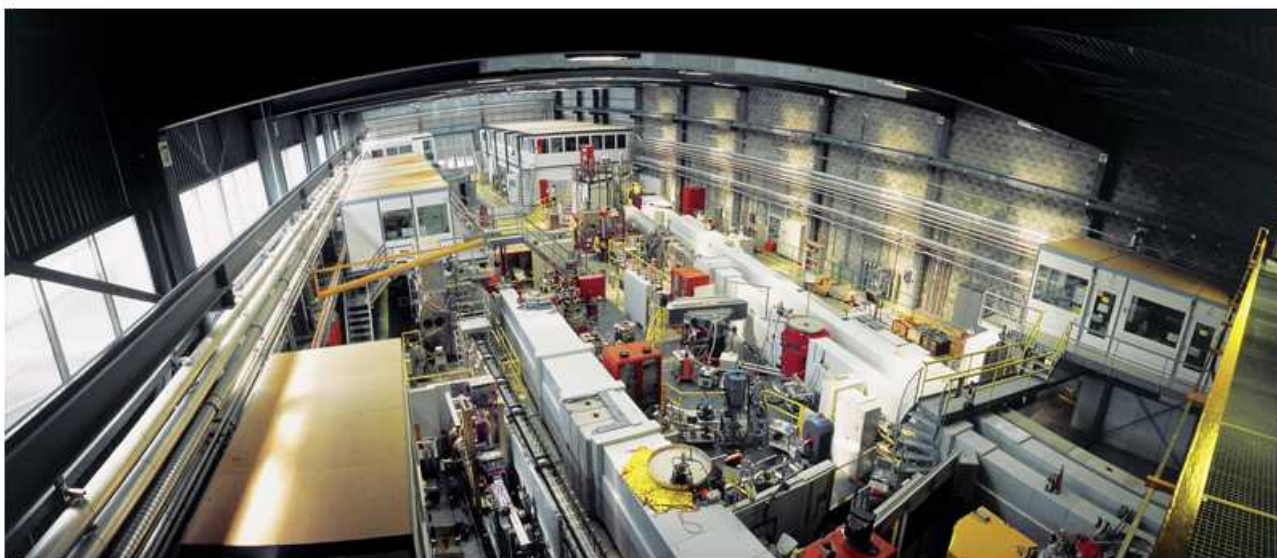


Рисунок 159: Экспериментальный зал источника нейтронов Института Поля Шерера (Виллиген, Швейцария). С сайта [162].

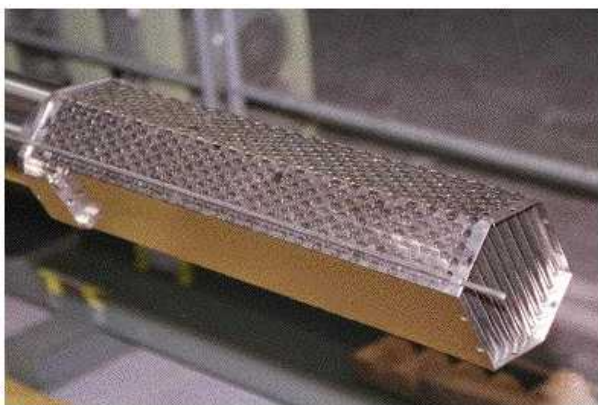


Рисунок 160: Свинцовая мишень, в которой образуются нейтроны. С сайта [162].

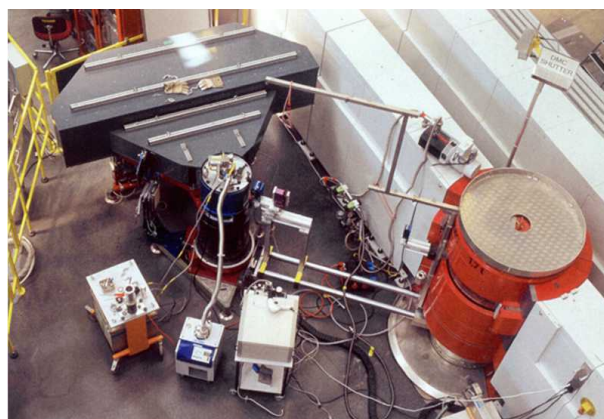


Рисунок 161: Один из дифрактометров Института Поля Шерера. С сайта [162].



Рисунок 162: Танк замедлителя перед установкой. Внутренний объём (диаметр около 2 метров) заливается тяжёлой водой. С сайта [162].

Приведём несколько примеров научных и технических результатов, полученных при помощи нейтронного источника PSI. Во-первых, это разнообразные дифракционные эксперименты (рисунок 163), в которых исследуемый кристалл играет роль дифракционной решётки. Анализ дифракционной картины позволяет восстановить информацию о структуре кристалла — то есть позволяет увидеть где и как расположены составляющие кристалл атомы. Во-вторых, большая проникающая способность нейтронов позволяет использовать их для неразрушающего контроля сложной техники (рисунок 164) и даже при анализе археологических объектов (рисунок 167).

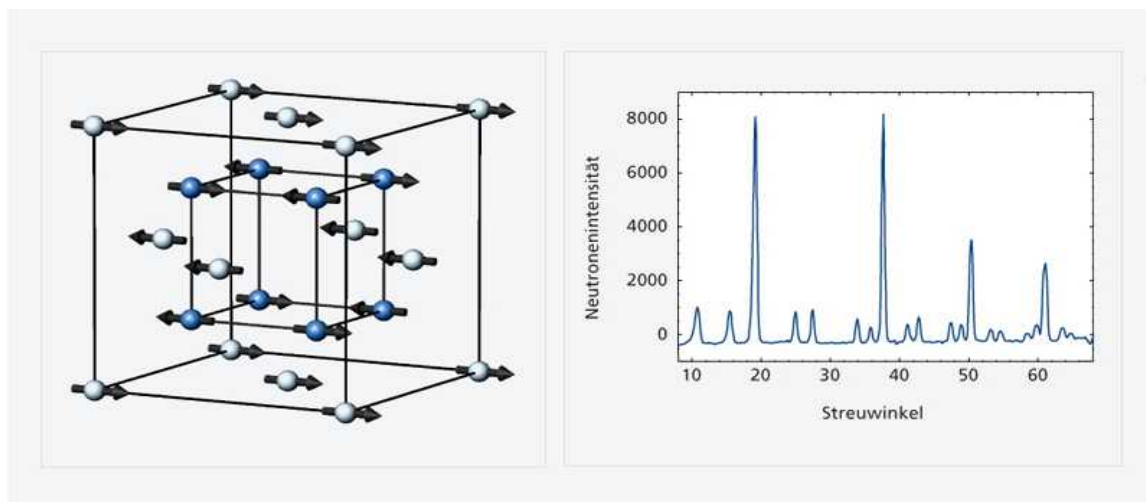


Рисунок 163: Пример картины дифракции нейтронов (справа), по которой восстановлена кристаллическая и магнитная структура кристалла $\text{Nd}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$ с сайта [162].

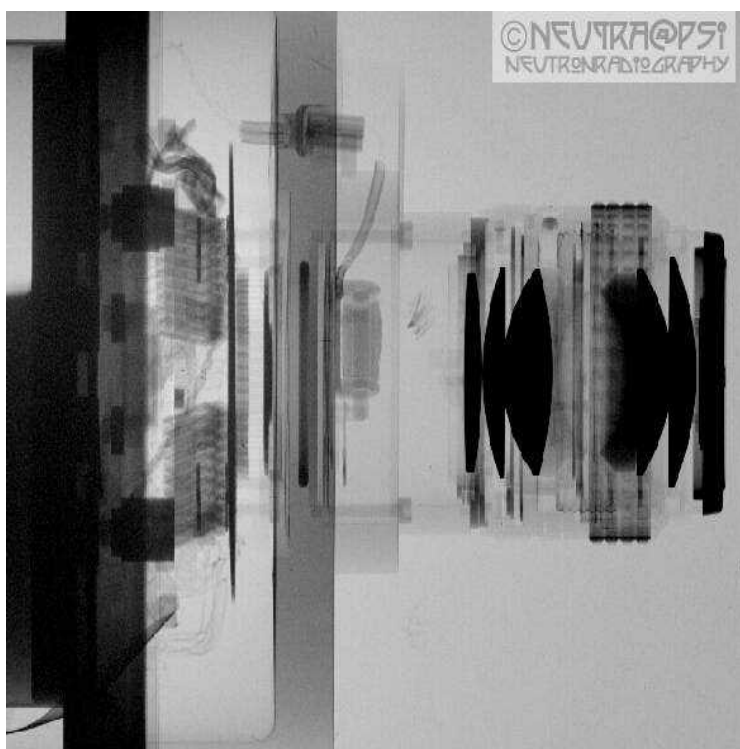


Рисунок 164: Нейтронная радиограмма фотообъектива для контроля качества. Борсодержащие линзы активно поглощают нейтроны, обеспечивая высокий контраст изображения. С сайта [162].



Рисунок 166: Нейтронная радиограмма матришки. С сайта [162].

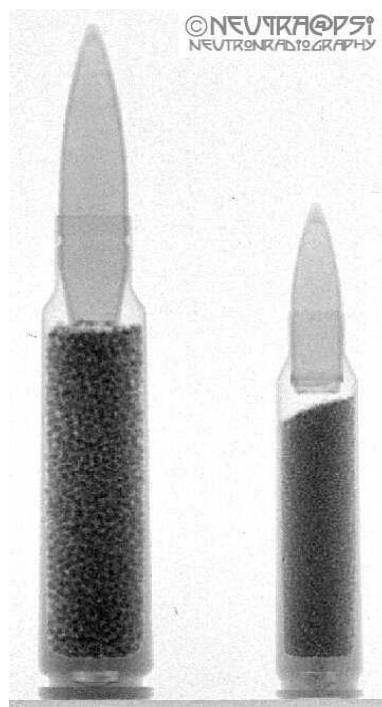


Рисунок 165: Нейтронные радиограммы патронов. Высокое поглощение в водородсодержащей органике позволяет различить даже отдельные гранулы пороха. С сайта [162].



Рисунок 167: Бронзовая статуэтка 15 века (Тибет) и её нейтронная радиограмма, показывающая присутствие внутри фрагментов растений. С сайта [162].

Нейтронные источники в России.

В России на данный момент нет центров для нейтронных исследований¹, сравнимых по характеристикам всего комплекса (как по характеристикам потока нейтронов, так и по характеристикам дополнительного экспериментального оборудования) с лидирующими в этой области Институтом Лауэ-Ланжевена и Институтом Поля Шерера.

В работе находятся реакторы (перечислены реакторы, конструктивно предназначенные для вывода потока нейтронов из активной зоны):

- ВВР-М в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ, Гатчина) [163][164]. Реактор введён в строй в 1959 году, имеет тепловую мощность 18 МВт и поток нейтронов $1...4 \cdot 10^{14}$ 1/(см² сек).
- ВВР-Ц в Обнинске в Физико-химическом институте им. Л.Я.Карпова, больше фокусируется на радиохимии и материаловедении [165]. Введён в строй в 1964 году.
- ИВВ-2М в Нейтронном материаловедческом комплексе Института физики металлов УрО РАН [166]. Реактор введён в строй в 1966 году, модернизирован в 2006. Тепловая мощность 15 МВт, поток нейтронов в активной зоне $1...4 \cdot 10^{14}$ 1/(см² сек).
- ИР-8 в Москве (Курчатовский институт), введённый в строй в 1981 году [167].
- ИБР-2 в Дубне (Лаборатория нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований) [168]. Это реактор импульсного типа уникальной схемы с подвижным отражателем. Вращающиеся отражатели обеспечивают периодический быстрый рост мощности (и потока нейтронов) в реакторе. Во время импульса поток нейтронов достигает значений 10^{16} 1/(см² сек), но среднее значение составляет всего 10^{13} 1/(см² сек). Реактор введён в строй в 1981 году, с 2006 по 2011 год был на модернизации.
- ПИК в Гатчине (ПИЯФ) [169][164]. Это строящийся реактор, являющийся одним из самых знаменитых долгостроев: его строительство было начато в 1976 году, в 2011 году был проведён пробный пуск цепной реакции в реакторе. Этот реактор по характеристикам должен быть сравним с реактором Института Лауэ-Ланжевена.

¹ С дополнительным сожалением стоит отметить, что информация о статусе этих реакторных центров и проводящихся на них в «реальном времени» исследованиях труднодоступна, а официальные сайты часто не информативны.



Рисунок 168: Работы в зале реактора ИБР-2 (Дубна). С сайта [168].

Ускорители элементарных частиц.

Виды ускорителей и история их развития.



Рисунок 169: Генератор Ван де Граафа первого венгерского линейного ускорителя, в 1952 году достигнуто напряжение 1МВ. С сайта [171].



Рисунок 170: Умножитель Кокрофта-Валтона, 1937 год. С сайта [170].

Простейшим видом ускорителей являются линейные ускорители. В них частица разгоняется по прямой под действием высоковольтного потенциала либо «сопровождающего» частицу переменного электрического поля. Высокое напряжение в компактных линейных ускорителях получалось обычно либо генератором Ван де Граафа [171], в котором поляризация диэлектрической ленты служила для накопления электрического заряда (рисунок 169), либо генератор (умножитель) Кокрофта-Валтона [170], состоящий из каскадов конденсаторов и диодов (рисунки 170, 172). Эти генераторы позволяли получить высокое напряжение в несколько мегавольт. В современных ускорителях эти простые ускорители используются как «первый каскад» для начального ускорения частиц (например, [172], рисунок 172 или рисунок 156)

Дальнейшее увеличение напряжения (и, соответственно, энергии ускоряемых частиц) ограничено техническими сложностями, связанными с пробоем высокого напряжения. В линейных ускорителях на большие энергии разгоняющее напряжение создаётся набором электродов, на которые подаётся переменное напряжение с подобранными амплитудами, частотами и фазами, обеспечивающими «сопровождение» частицы электрическим полем во

время её движения ([173], см. схему на рисунке 171). Общим преимуществом линейных ускорителей является возможность ускорения тяжёлых частиц (в циклотронах и других ускорителях с движением по кругу радиус кривизны зависит от магнитного поля и массы частицы: $R = \frac{mV}{qB}$ (для нерелятивистской частицы), таким образом для более тяжёлой частицы для достижения той же скорости потребуется большее магнитное поле), непрерывный режим работы, отсутствие синхротронного излучения.

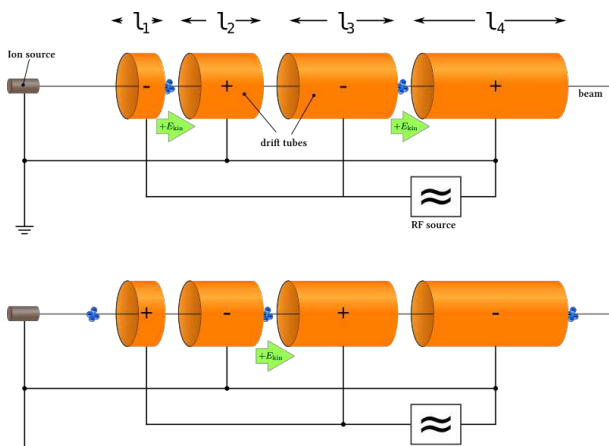


Рисунок 171: Схема линейного ускорителя с многосекционными электродами. С сайта [173].



Рисунок 172: Протонный ускоритель Кокрофта-Валтона на 750 кэВ, являющийся первой ступенью ускорительного комплекса лаборатории Фермилаб (США). С сайта [172].



Рисунок 174: Современный медицинский линейный ускоритель в Стэнфордском центре комплексного исследования рака. С сайта [174].



Рисунок 173: Первый медицинский линейный ускоритель (Стэнфорд, конец 1950-х годов). С сайта [174].

Первые линейные ускорители были созданы Кокрофтом и Валтоном в лаборатории Резерфорда в начале 1930-х (Нобелевская премия по физике 1951 года). В простейшей версии с постоянной разностью потенциалов (фактически, модификации рентгеновской трубки) были достигнуты энергии протонов в 300 кВ, в последующих версиях с многосекционными электродами — 700 кВ.

Линейные ускорители электронов с энергией 5-20 МэВ используются в медицинских приложениях для радиационной терапии опухолей (используется либо сам пучок электронов, либо производимое при его попадании в мишень жёсткое рентгеновское излучение) [174]. Аналогичные ускорители используются как мощные рентгеновские источники в дефектоскопии. Линейные ускорители являются первой стадией различных циклических ускорителей, сообщая заряженным частицам начальную скорость. Рекордсменом среди линейных ускорителей является Стэнфордский линейный ускоритель длиной 3.2 км (самое прямое здание в мире), способный ускорять протоны и электроны до энергии 50 ГэВ [175].



Рисунок 175: Вид с воздуха на комплекс зданий Стэнфордского линейного ускорителя. Детекторный комплекс справа. Сам канал ускорителя находится на глубине 10 метров под землёй. С сайта [175].

Для получения больших энергий частиц в относительно компактных ускорителях траекторию частицы искривляют магнитным полем. Частица начинает двигаться по окружности, а её энергия (и скорость) увеличиваются за счёт колеблющегося в фазе с движением частицы переменного электромагнитного поля. Отметим, что с проявлением взаимодействия движущейся частицы и электромагнитного поля мы сталкиваемся почти ежедневно на своей кухне — в микроволновой печи СВЧ излучение создаётся в специальном приборе — магнетроне, в котором энергия движущихся электронов превращается в энергию колебаний электромагнитного поля, что, очевидно, является «ускорителем наоборот».

Первым из циклических ускорителей был циклотрон [176], изобретённый в 1929 году Э.Лоуренсом (Нобелевская премия по физике 1939 года). Схема циклотрона и один из первых «настоельных» циклотронов показаны на рисунках 176, 177.

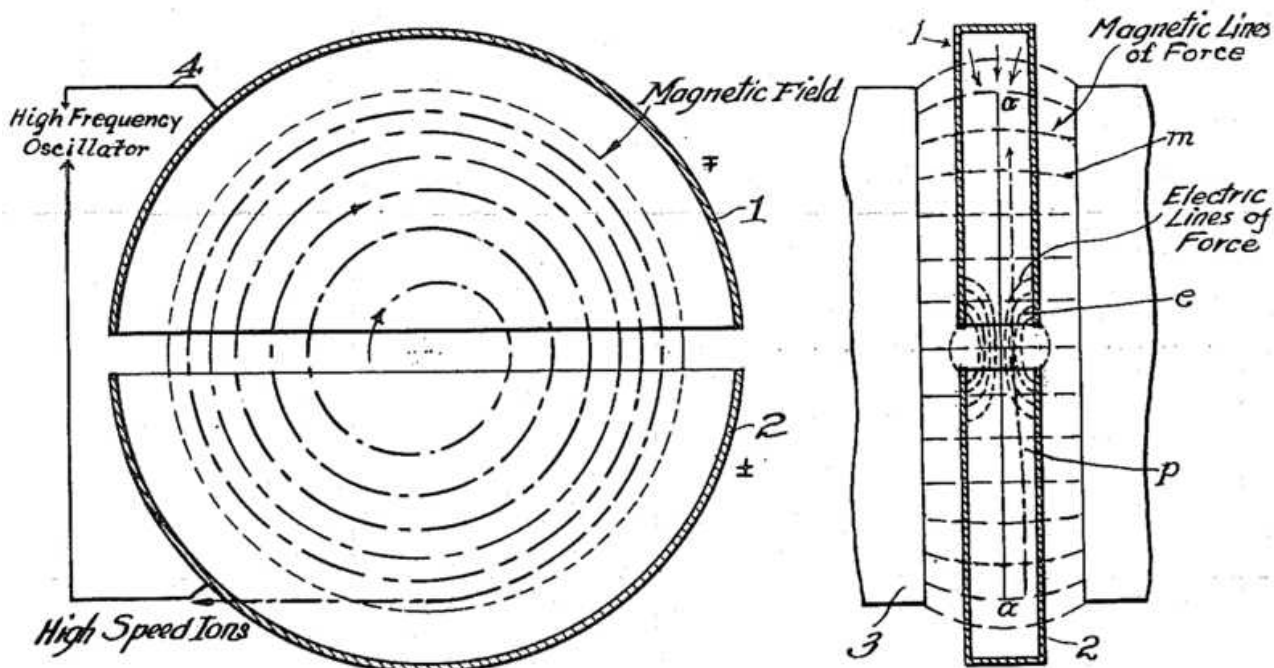


Рисунок 176: Схема циклотрона из патентной заявки Лоуренса, 1934 год. С сайта [176].

В циклотроне частицы движутся в постоянном поле между полюсами магнита внутри двух электродов в форме латинской буквы “D”.¹ На электроды подаётся переменное напряжение, частота которого подобрана так, что при пролёте частиц в зазоре между электродами электрическое поле ускоряет частицы. В нерелятивистском случае частота обращения

частицы в магнитном поле $f = \frac{1}{T} = \frac{V}{2\pi R} = \frac{V}{2\pi \frac{mV}{qB}} = \frac{qB}{2\pi m}$ определяется только внешним

полем и удельным зарядом частицы (составляет для электронов 28 ГГц в поле 1Т). При совпадении частоты переменного напряжения с этой (циклотронной) частотой будет происходить разгон пакета частиц, проходящего зазор электродов в то время, когда электрическое поле направлено в «ускоряющем» направлении. Достоинством циклотрона является отсутствие необходимости создавать большое напряжение — в циклотроне энергия добавляется маленькими порциями на каждом обороте. Недостатком является увеличение радиуса траектории с ростом скорости, ограничивающее размерами циклотрона максимальную энергию, а также релятивистские эффекты, из-за которых на релятивистских скоростях циклотронная частота начинает зависеть от скорости частицы. Для учёта этих факторов схему циклотрона модернизируют, подстраивая частоту для компенсации релятивистских эффектов (синхроциклотрон) либо создавая неоднородное (увеличивающееся с радиусом) магнитное поле (изохронный циклотрон).

¹ Другим способом представить себе форму электродов является разрезанная пополам тонкая консервная банка. Получается два электрода, электроны движутся внутри этой «банки», а при пролёте в зазоре между электродами подвергаются действию электрического поля электродов.



Рисунок 177: Циклотрон, построенный в 1937 году. С сайта [176].

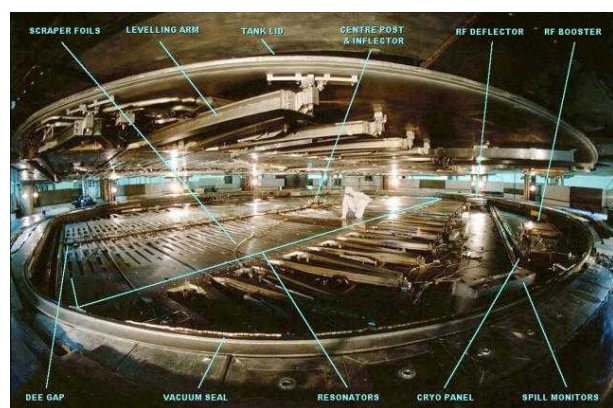


Рисунок 179: Вакуумная полость циклотрона Триумф во время регламентных работ. С сайта [177].



Рисунок 178: Экспериментальный зал циклотрона Триумф (Ванкувер, Канада). Циклотрон на заднем плане скрыт под бетонными блоками толщиной около 5 метров. С сайта [177].

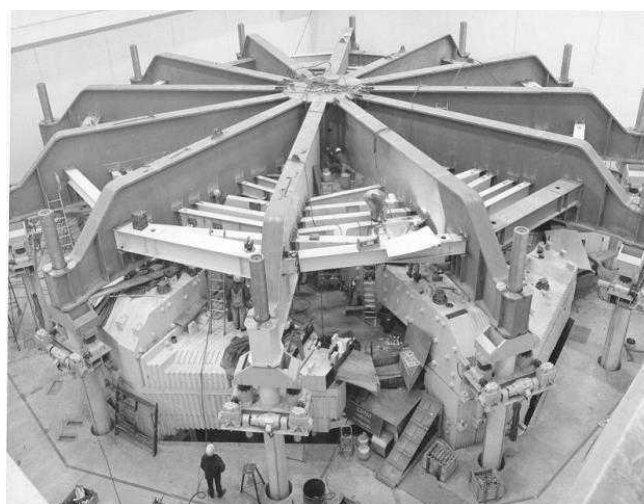


Рисунок 180: Циклотрон Триумф после окончания монтажных работ. С сайта [177].

Первая пробная модель циклотрона, созданная Лоуренсом ускоряла протоны до энергии 80 кэВ, её можно было поднять руками, она имела диаметр около 10 см. С ростом энергии циклотроны также росли в размерах. В современных циклотронах протоны ускоряются до энергии около 500 МэВ. Крупнейший в мире циклотрон находится в канадской лаборатории Триумф (TRIUMF, Ванкувер, Канада) [177] (рисунки 178, 179, 180). Название лаборатории является сокращением от TRI-University Meson Facility (мезонный комплекс трёх университетов), лаборатория была основана совместно тремя канадскими университетами (Университетом Симона Фразера, Университетом Британской Колумбии и Университетом Виктории) в 1968 году. В дальнейшем лаборатория выделилась в независимую Национальную лабораторию. Диаметр главного магнита этого циклотрона составляет 18 метров, вес магнита 4000 тонн, поле в азоре 0.46 Т. Протоны (точнее, отрицательные ионы водорода H^- ускоряются до энергии 500 МэВ при помощи осциллирующего на частоте 23 МГц электрического поля с напряжением «всего» 94 кВ.

Циклотроны используются в медицинских приложениях для пучковой терапии раковых заболеваний, производства бета-активных изотопов для позитронной эмиссионной томографии. В научных приложениях циклотроны используются как источники пучков частиц для других применений (например, в Институте Поля Шерера пучком протонов из циклотрона бомбардируют мишени для производства нейтронов и мюонов, см. рисунок 157).



Рисунок 181: Бетатрон, 1942 год. Энергия электронов 6МэВ. С сайта [178]



Рисунок 182: Д.Керст рядом с бетатронами на 2.3 МэВ (маленький) и на 25 МэВ (большой). С сайта [179]

Другим вариантом циклического ускорителя является бетатрон [178], [179] (рисунки 181, 182). Концепция этого ускорителя была предложена норвежским физиком Р.Вилироэ в 1928 году, но первый работающий бетатрон был создан американцем Д.Керстом в 1940 году. Здесь для ускорения электронов используется вихревое электрическое поле, возникающее при изменении магнитного потока — в некотором смысле пучок электронов играет роль вторичной обмотки трансформатора. Рабочим является первая четверть периода переменного напряжения в первичной обмотке, когда магнитное поле и поток через камеру бетатрона увеличиваются. По уравнениям Максвелла (закон электромагнитной индукции)

$$\int \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{S} = -\frac{d\Phi}{dt}, \text{ так что при нарастании потока вихревое поле сохраняет}$$

свой знак и всё время ускоряет электрон. Благодаря простоте конструкции бетатроны с энергией 20-50 МэВ широко используются в прикладных целях, в основном для создания рентгеновского и гамма излучения при торможении электронов в мишени.

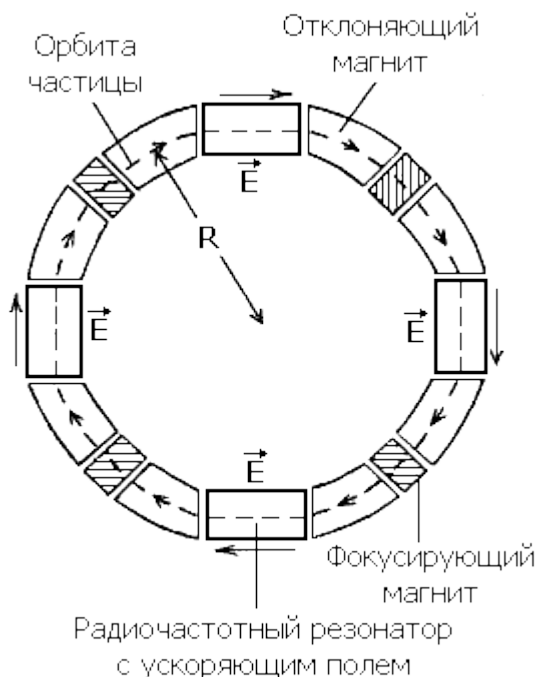


Рисунок 183: Схема синхротрона. С сайта [180].

Следующим этапом развития ускорительной техники стали синхротроны и синхрофазотроны [180], [181]. Большинство современных ускорителей работают по этому принципу (в том числе и Большой адронный коллайдер). Принцип работы синхротрона был впервые сформулирован советским физиком В.Векслером в 1944 году и независимо от него американцем Э.Макмиланом в 1945 году. Макмилан является Нобелевским лауреатом по химии 1951 года за открытие и исследование трансурановых элементов). Первый электронный синхротрон построен Макмиланом.

В синхротроне частицы движутся по орбите фиксированного радиуса, поочередно проходя через микроволновые резонаторы, в которых они ускоряются за счёт взаимодействия с электромагнитным полем, отклоняющие магниты, обеспечивающие движение по заданной траектории, и фокусирующие магниты («магнитные линзы»), компенсирующие расхождение пучка. Начальная энергия частицам сообщается в ускорителе-инжекторе (обычно линейный

ускоритель или циклотрон). Для поддержания постоянной траектории по мере роста энергии частиц синхронно увеличивается магнитное поле отклоняющих магнитов, корректируется частота и фаза ускоряющих напряжений. Из-за этого синхронного изменения ускоритель и получил название синхротрон.

В отличие от циклотрона или бетатрона, синхротрон не привязан к размерам одного магнита: отклоняющие магниты (часто сверхпроводящие) могут быть достаточно компактны и располагаться вдоль кольца синхротрона, которое может достигать внушительных размеров (длина кольца Большого адронного коллайдера около 27 километров).



Рисунок 184: Зал Австралийского синхротрона. С сайта [181].



Рисунок 185: Фрагмент ускорительного кольца протонного синхротрона БАК на 7 ТэВ (ЦЕРН). С сайта [180].



Рисунок 186: Ускорительные кольца лаборатории Фермилаб (США). С сайта [182].

Синхротроны внесли большой вклад в открытие новых частиц и трансурановых элементов. Максимальная энергия достигнутая в электронных синхротронах составляет около 100 ГэВ (ограничивается синхротронным излучением, интенсивность которого $P \propto \frac{1}{R^2} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2$ растёт с ростом энергии частиц), в протонном синхротроне Большого адронного коллайдера достигнута энергия 7 ТэВ.

Синхротроны часто используются как источники рентгеновского излучения (синхротронное излучение [15], см. также стр.42), с этой целью перепрофилировались устаревшие (недостаточно мощные) синхротроны и строились синхротроны специально предназначенные для исследований при помощи синхротронного излучения. В режиме источника излучения синхротрон практически не ускоряет частицы, а работает «кольцом-накопителем», лишь компенсируя потери энергии на излучение.

Для исследования столкновения частиц ускоренные синхротроном частицы либо направляют на неподвижную мишень, либо используют два синхротрона, обеспечивая пересечение их пучков (например, в лаборатории Фермилаб в США [182], см. рисунок 186). Отметим, что так как направление силы Лоренца для частиц и античастиц отличается, то для столкновения частиц и античастиц можно обойтись одним синхротроном, запустив пучки частиц и античастиц в противоположных направлениях.

Ускорители ЦЕРН.

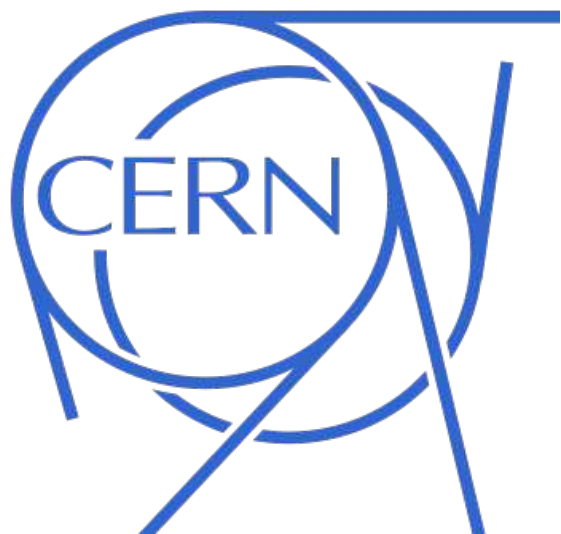


Рисунок 187: Логотип ЦЕРН. С сайта [183]

ЦЕРН (CERN, от французского названия организации-предшественника *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) является крупнейшим международным центром в области ядерных исследований [183], [184]. ЦЕРН находится на границе Франции и Швейцарии неподалёку от Женевы. Интересно отметить, что ускорительные кольца ЦЕРН пересекают границу Франции и Швейцарии (рисунок 189).

ЦЕРН был основан в 1954 году, в настоящее время в программу ЦЕРН вовлечено 20 стран-участниц из Европы. Россия имеет статус страны-наблюдательницы. В ЦЕРН постоянно работает около 2400 сотрудников и около 10000 учёных из разных стран посещают его ежегодно. Годовой бюджет ЦЕРН составляет около 1 миллиарда долларов США.

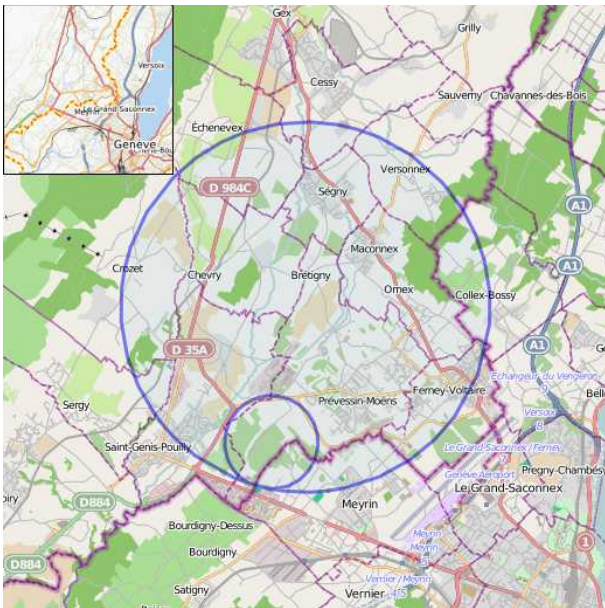


Рисунок 189: Расположение колец Большого адронного коллайдера (большой круг) и Суперпротонного синхротрона (маленький) ЦЕРН. С сайта [183].

Помимо огромного вклада в физику элементарных частиц, ЦЕРН внёс вклад и в развитие компьютерных технологий. Большие объёмы данных, получаемых в ЦЕРН и необходимость сделать их доступными для коллег, работающих во всех странах мира привели к рождению и развитию всемирной сети Интернет (рисунок 188) .



Рисунок 188: Мемориальная табличка "Здесь родился Интернет" в ЦЕРН. С сайта [183].

CERN Accelerator Complex

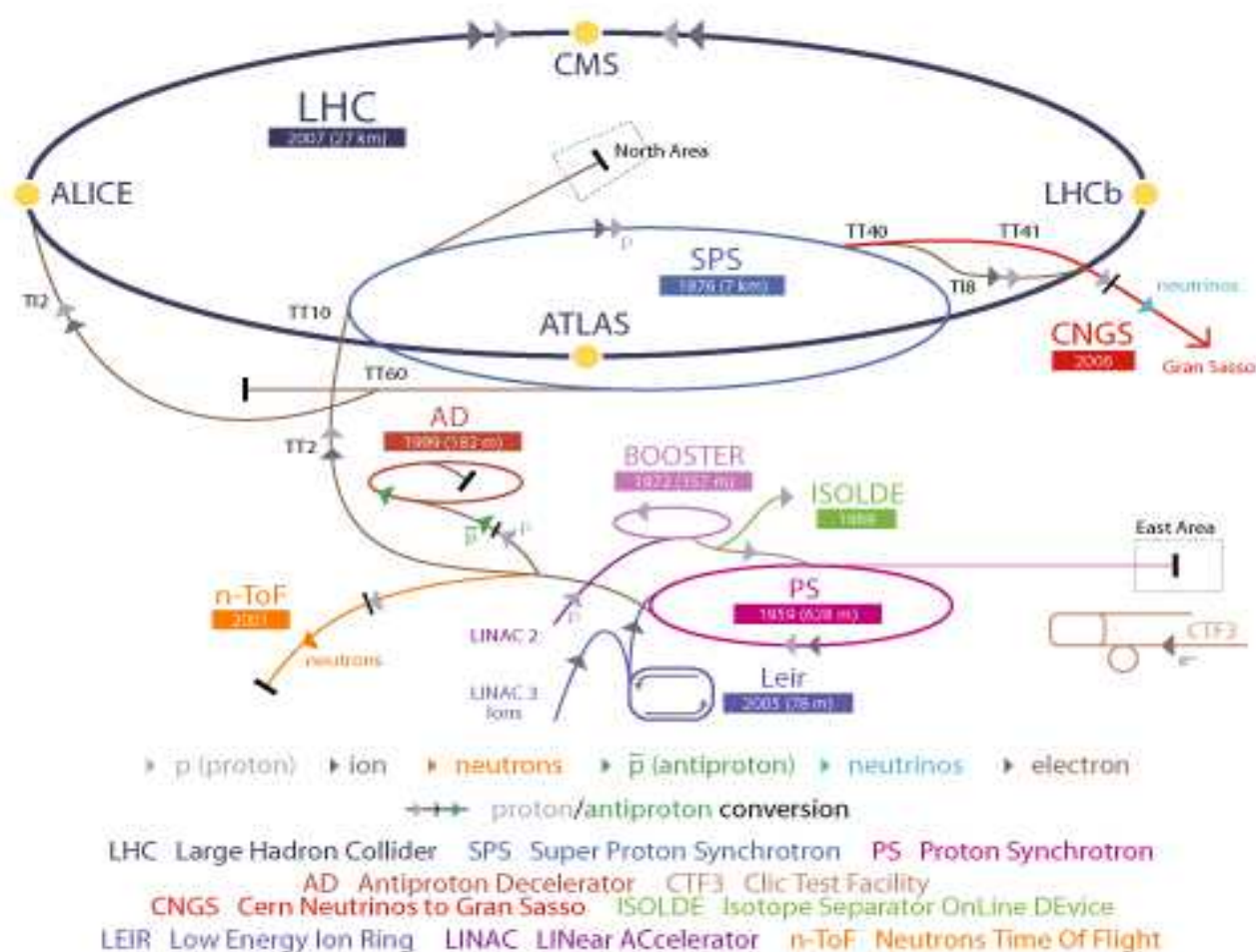


Рисунок 190: Схема современного ускорительного комплекса ЦЕРН. С сайта [185].

В данный момент в ЦЕРН работает несколько ускорителей [185] (рисунок 190):

- Протонный синхротрон (PS). Запущен в 1959 году, длина кольца 628 метров, 277 резистивных электромагнитов, энергия протонов 20 ГэВ. Этот синхротрон также использовался для ускорения альфа-частиц, ядер кислорода и серы, электронов, позитронов и антипротонов. Синхротрон PS в течение короткого времени после запуска был самым мощным в мире. В настоящее время он в основном используется как предварительная стадия разгона частиц для более крупного ускорителя SPS.
- Суперпротонный синхротрон (SPS). Это представитель следующего поколения синхротронов, длина его кольца почти 6 километров, вдоль кольца установлено 1317 резистивных магнитов для контроля пучка. Протоны ускоряются до энергии 450 ГэВ. Ускоритель также использовался и для ускорения других частиц: ядер серы и кислорода, электронов и позитронов, антипротонов. На ускорителе SPS в режиме встречных пучков протонов и антипротонов были в 1983 году получены подтверждения существования W и Z бозонов (Нобелевская премия Руббиа и Ван дер Меера 1984 года). В настоящее время SPS используется как предварительный ускоритель для Большого адронного коллайдера, а также в нейтринных экспериментах для получения пучка нейтрино, направленного в итальянскую обсерваторию Гран-Сассо в 730 километрах от ЦЕРН.

- Большой адронный коллайдер (БАК, LHC) [186][187] это самый мощный из ускорителей в мире . Туннель БАК находится на глубине 50-150 метров, имеет длину около 27 километров, так что для обслуживания комплекса техникам приходится перемещаться по туннелю на велосипедах (рисунки 191, 192). Пучок контролируется 1232 сверхпроводящими магнитами. Ускоритель выдал первый пучок в 2008 году и на данный момент продолжают работы по достижению проектной мощности: ускорение протонов до энергии 7 ТэВ и ускорение ядер свинца до энергии 574 ТэВ. В 2010-11 году достигнут уровень энергии 3.5 ГэВ, в 2015 была достигнута энергия пучка 6.5 ГэВ. На БАК планируется проведение нескольких основных экспериментов:

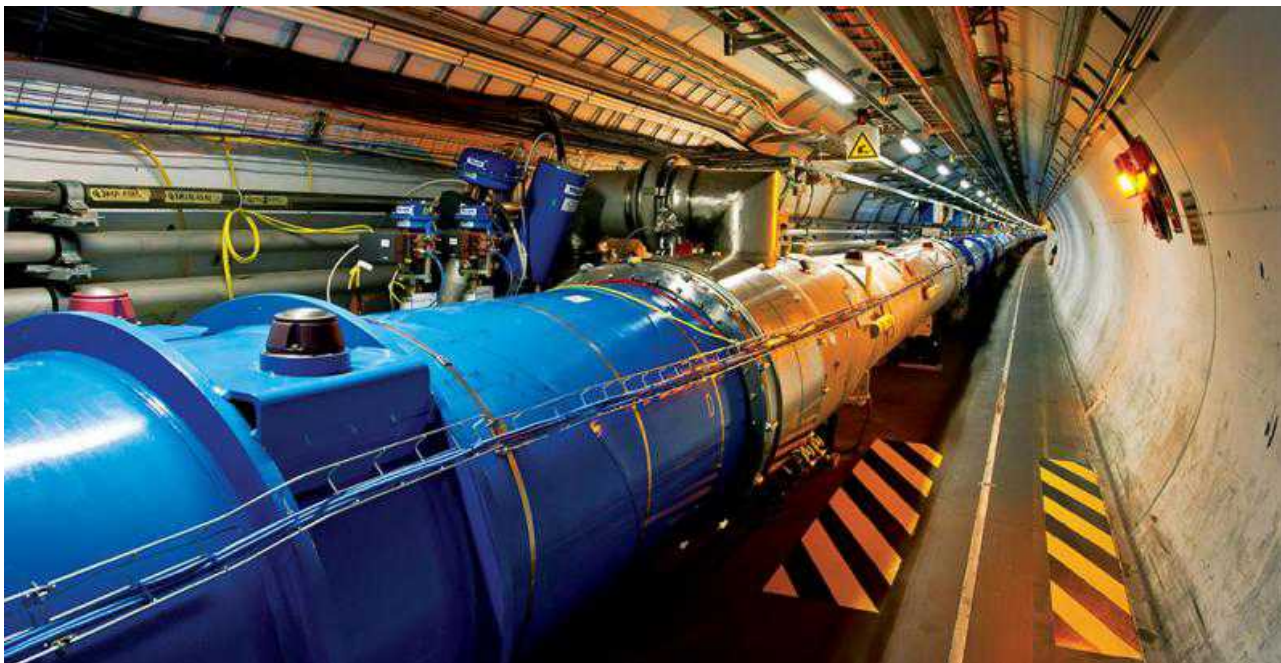


Рисунок 191: Туннель Большого адронного коллайдера. С сайта [186].



Рисунок 192: Передвижение техников по каналу Большого адронного коллайдера. С сайта [186].

- ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [188][189]. В этом эксперименте в столкновении ядер свинца планируется достичь условий, сравнимых с условиями сразу после Большого Взрыва, и возможно наблюдать формирование кварк-глюонной плазмы (состояния, когда нуклоны «плавятся»).

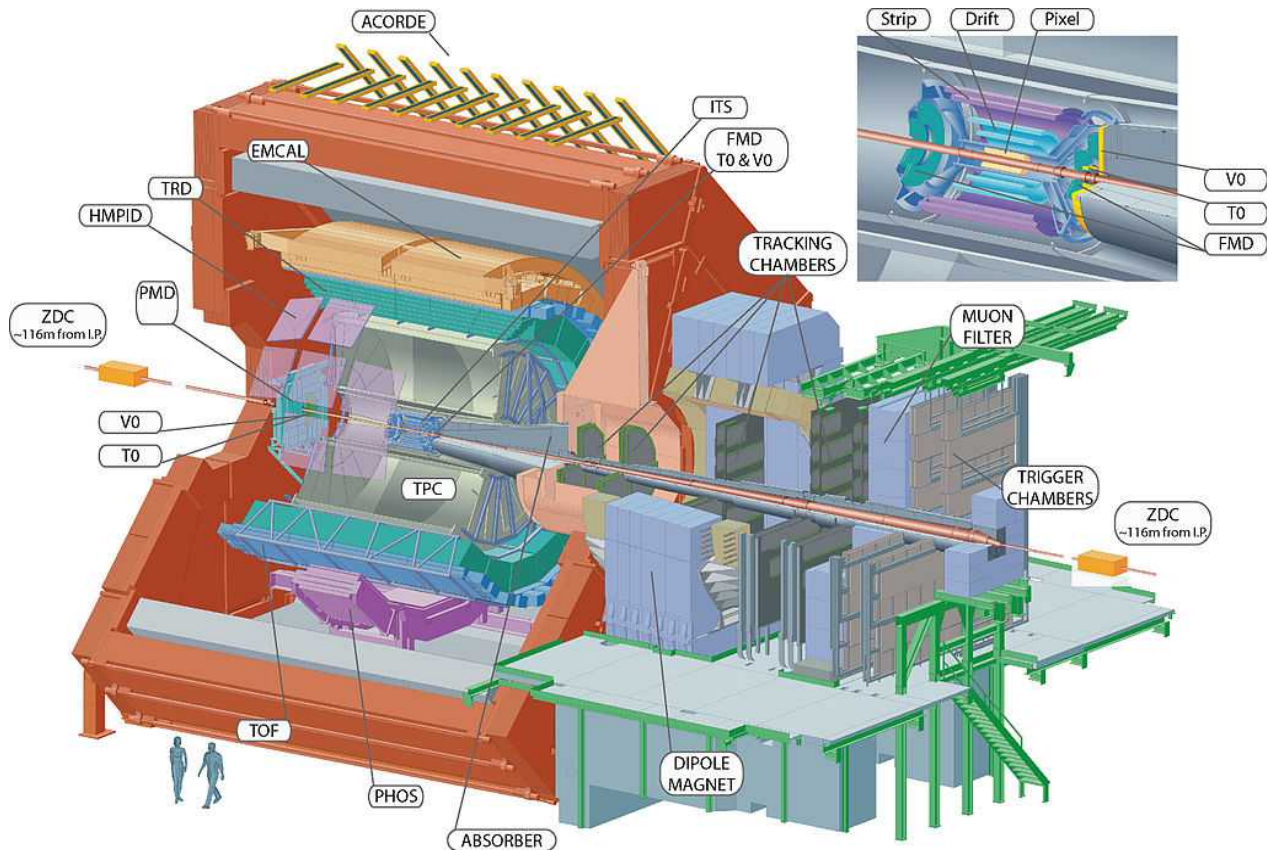


Рисунок 193: Схема детектора эксперимента ALICE. Вес детектора 10000 тонн, длина 26 метров, диаметр 16 метров. С сайта [189]

- ATLAS [190][191][192]. Детектор общего назначения, который используется для поиска новых частиц, в том числе он использовался при поиске бозона Хиггса. Это самый большой из построенных на данный момент детекторов частиц.

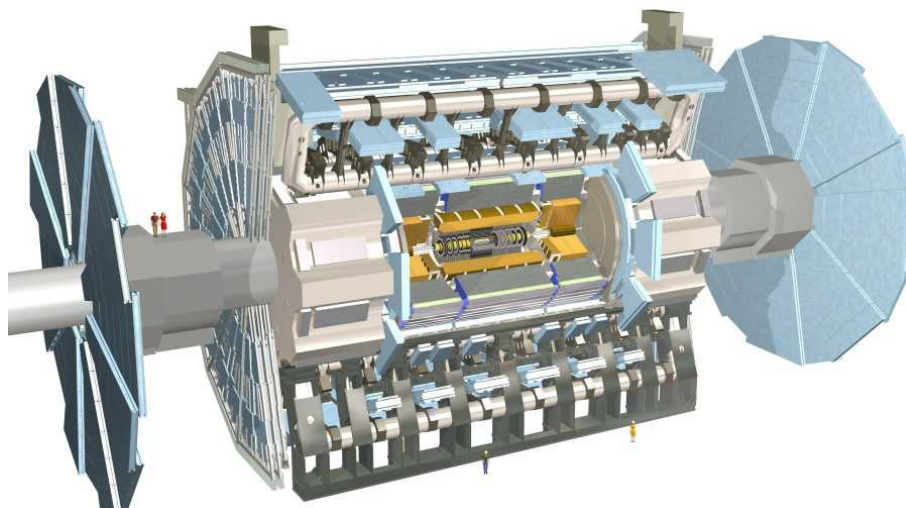


Рисунок 194: Детектор ATLAS. Длина 46 метров, диаметр 25 метров, масса 7000 тонн. С сайта [192]



Рисунок 195: Монтаж детектора ATLAS, 2007 год. С сайта [190].



Рисунок 196: Монтаж детектора CMS. С сайта [187].

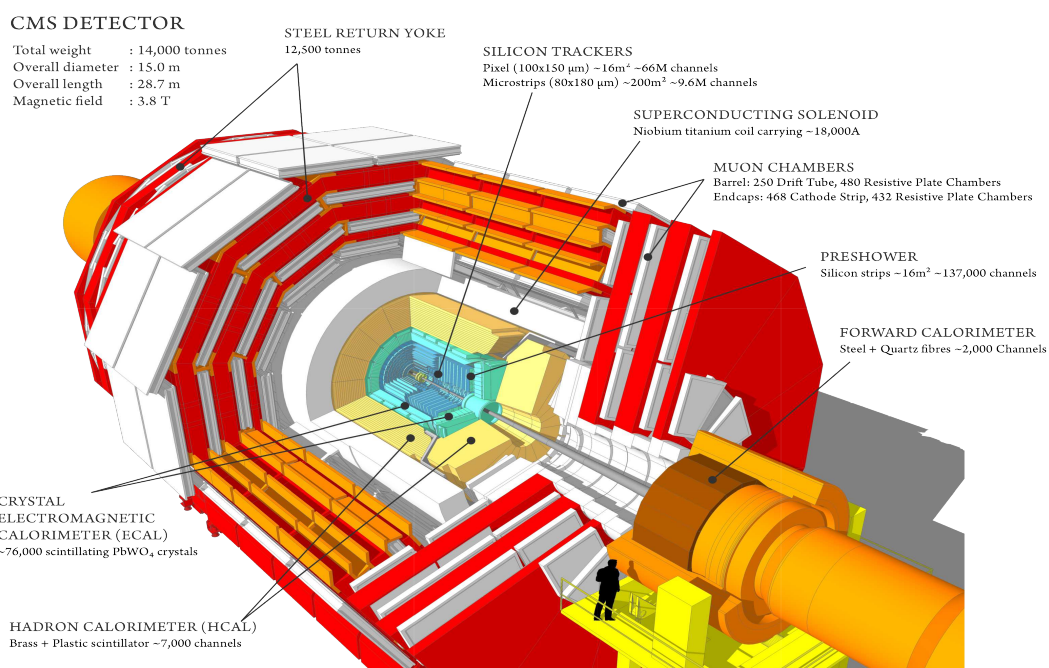


Рисунок 197: Детектор CMS. Длина 21 метр, диаметр 15 метров, вес 12500 тонн. С сайта [194].

- CMS (Compact Muon Solenoid) [193][194]. Это ещё один детектор частиц общего назначения, который использует несколько другие решения чем детектор ATLAS, дополняя его возможности.
- LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) [195][196]. В этом эксперименте планируется исследование свойств частиц, содержащих прелестный b-кварк. Ожидается, что в этом эксперименте удастся получить результаты связанные с различными видами нарушения чётности (см. стр. 139), что позволит объяснить преобладание вещества над антивеществом в нашей Вселенной. На детекторе LHCb в 2015 году были обнаружены пентакварки (барионы, содержащие 5 кварков [150])

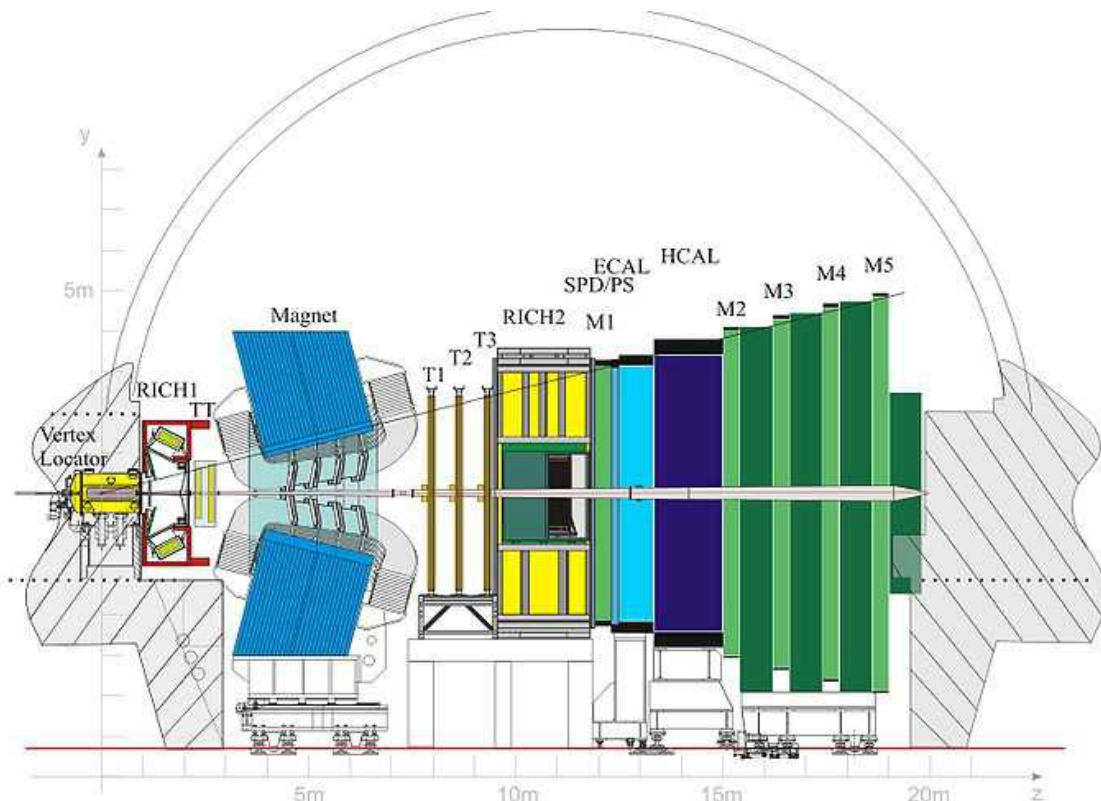


Рисунок 198: Схема детектора LHCb. Длина 21 метр, высота 10 метров, ширина 13 метров, масса 5600 тонн. С сайта [195].

- Кроме этого в комплекс ускорителей ЦЕРН входит замедлитель антипротонов (AD – The Antiproton Decelerator) [137], который связан с опытами по получению и удержанию антивещества (в 2011 году преодолена отметка в 1000 секунд удержания нейтральных атомов антиводорода, см. также стр. 141).

Ускорители США: Стэнфорд, Фермилаб.

Рассмотрим несколько известных ускорителей в США.

В Стэнфордском университете (Калифорния) находится самый длинный в мире линейный ускоритель SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) [175][197]. Ускоритель работает с 1966 года, на нём были получены результаты, удостоенные трёх Нобелевских премий: в 1976 году за открытие очарованного кварка (наблюдение J/Ψ мезона с кварковым составом $c\bar{c}$), в 1990 году за открытие кварковой структуры протонов и нейтронов, в 1995 году за открытие тау-лептона.

Ускоритель SLAC может разгонять электроны и позитроны до энергии 50 ГэВ. Длина

линейного ускорителя составляет 2 мили (3.2 километра). Тоннель ускорителя проходит на глубине около 10 метров под землёй, идущая над тоннелем клистронная галерея, в которой размещены генераторы высокочастотного напряжения на электродах ускорителя длиной около 3 километров является самым прямым зданием в США (рисунки 175, 199, 200).

С линейным ускорителем сопряжены кольца электрон-позитронного колайдера PEP-II, использовавшегося с 1999 по 2008 год для эксперимента BaBar по поиску нарушений CP-симметрии.



Рисунок 199: Вид вдоль клистронной галереи ускорителя SLAC. С сайта [175]



Рисунок 200: Схема расположения ускорителей центра SLAC. С сайта [197].

Лаборатория Фермилаб (Национальная ускорительная лаборатория им. Э.Ферми) [182][198] находится рядом с городом Батавия недалеко от Чикаго. Синхротрон лаборатории Фермилаб был до пуска БАК самым мощным ускорителем в мире с длиной кольца 6.3 км разгоняя протоны и антипротоны до энергии в 0.98 ТэВ (рисунок 186). Это был первый ускоритель, практически достигший отметки 1 ТэВ, за что ему было дано название «Тэватрон». Ускоритель был запущен в 1983 году и неоднократно модернизировался.

Тэватрон, как и БАК, является последней ступенью целого каскада генераторов: генератор Кокорфта-Валтона ускоряет ионы H⁺ до 750 кэВ, далее 150 метровый линейный ускоритель увеличивает энергию до 400 МэВ, проходя через угольную фольгу ионы отдают электроны и получившиеся протоны попадают в предварительный ускоритель синхротронного типа, увеличивающий энергию до 8 ГэВ, протоны доразгоняются синхротроном-инжектором (построен в 1999) до 120-150 ГэВ и наконец поступают в кольцо Тэватрона, где достигают окончательной энергии 980 ГэВ. Среди открытий, сделанных на Тэватроне одним из наиболее значимых является открытие правдивого t-кварка.

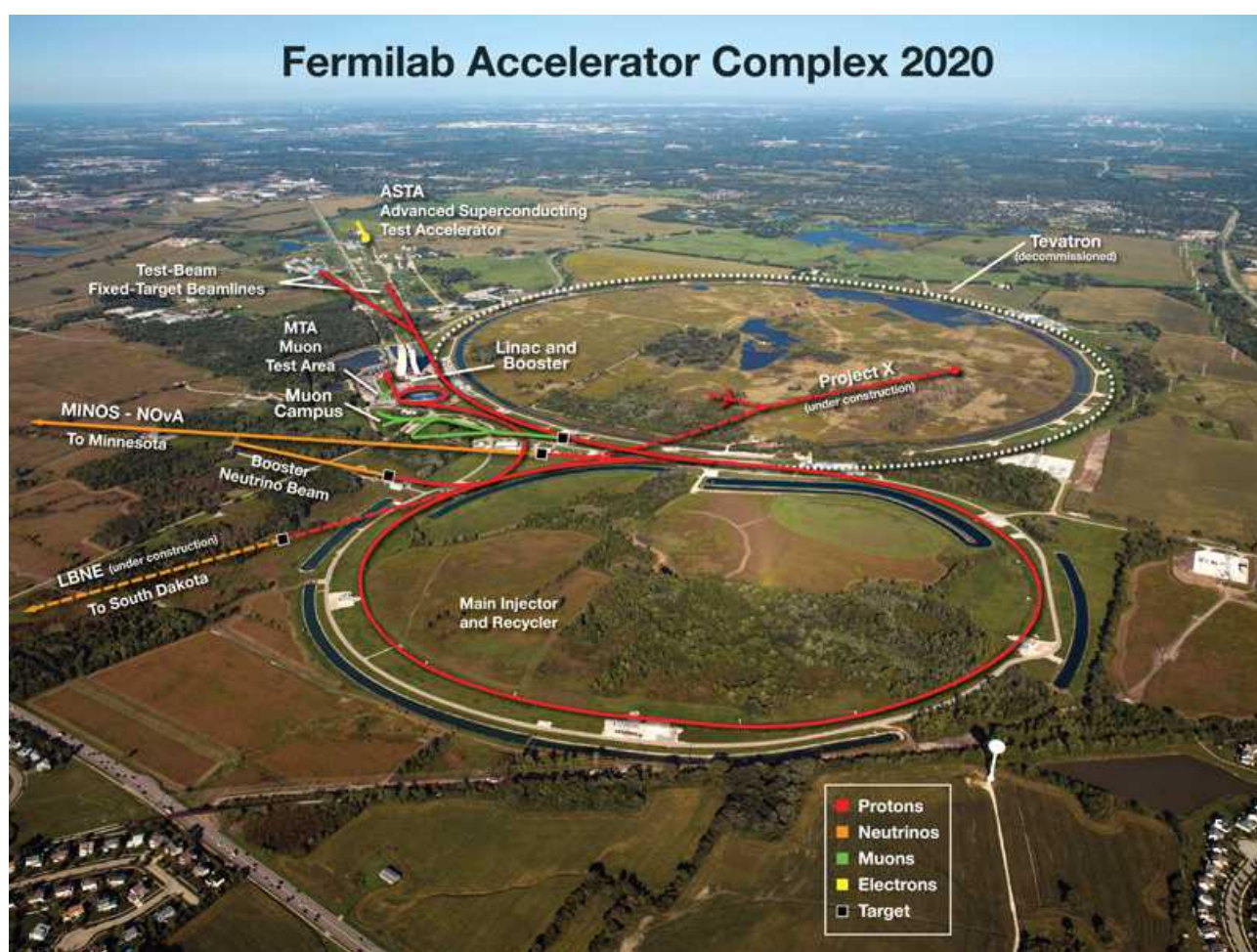


Рисунок 201: Ускорительный комплекс лаборатории Фермилаб, планы на 2020 год. С сайта [198].

Тэватрон был закрыт в 2011 году из-за недостаточности финансирования и в связи с тем что на БАК были достигнуты большие энергии частиц. Лаборатория продолжает развиваться в направлении нейтринных экспериментов (пучки нейтрино, создаваемые на ускорителях лаборатории детектируются в 700 километрах от лаборатории) и планирует строить с 2016 года новый ускоритель «Проект X» (ProjectX), включающий линейный ускоритель с большим током на 3 ГэВ для широкого круга экспериментов.

Ускорители СССР и России: Протвино, Дубна, Новосибирск.

В Советском Союзе и России было несколько ускорительных центров. Кроме этого, наши учёные принимают активное участие в работе международных групп (коллабораций) в ЦЕРН и других мировых центрах физики высоких энергий. По экономическим причинам наша страна вышла из «гонки больших ускорителей», но на ускорительных комплексах СССР и России был получен ряд важных результатов и для их характеристик остаются «ниши» для проведения современных исследований. К сожалению (за приятным исключением ОИЯИ в Дубне), информация о состоянии этих комплексов в данный момент не всегда достаточно открыта и судить об их текущем состоянии сложно.

Ускоритель У-70, Протвино.

Самым высокоэнергетичным ускорителем в России и СССР является протонный синхротрон У-70, построенный в Протвино (рядом с Серпуховым) [199][200]. Длина кольца этого ускорителя почти 1.5 км, энергия протонов 70 ГэВ. Ускоритель был запущен в 1967 году. В 1970 на нём были впервые в мире получены ядра антигелия-3. В середине 1980-х годов началось строительство ускорительно-накопительного комплекса на 3 ТэВ, но строительство осталось незавершено (и потеряло приоритет в связи с вводом в строй БАК). В настоящее время ежегодно планируется два сеанса работы ускорительного комплекса У-70 общей продолжительностью около 4 месяцев.



Рисунок 202: Синхротрон-бустер комплекса У-70. С сайта [200].



Рисунок 203: Внутренний периметр кольца протонного синхротрона У-70. С сайта [200].

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна.

Другим центром ядерной физики в России является Дубна, где расположен Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ) [201]. ОИЯИ, организованный в 1956-57 годах на базе Института ядерных проблем АН СССР, является уникальным для советской науки центром. Этот институт появился не в рамках АН СССР или какого-то из «ядерных» министерств, а, подобно ЦЕРНу, являлся результатом международного сотрудничества одиннадцати стран-учредителей из стран социалистического лагеря. В данный момент странами-членами ОИЯИ являются: Армения, Азербайджан, Белоруссия, Болгария, Вьетнам, Грузия, Казахстан, КНДР, Куба, Молдавия, Монголия, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Узбекистан, Украина, Чехия.

В 1947 году в ОИЯИ (тогда ещё в Институте ядерных проблем АН СССР) был запущен крупнейший на тот момент пятиметровый синхроциклотрон на энергию 560 МэВ. С конца 1950-х до 2002 года в ОИЯИ работал протонный синхрофазотрон на 10 ГэВ, в котором также

ставились опыты с более тяжёлыми ядрами (до серы). За сорок лет работы синхрофазотрона на нём было совершено несколько открытий, в частности: открытие антисигма-минус-гиперона, наблюдение явления полного разрушения ядер под действием частиц высокой энергии. В настоящее время синхрофазотрон демонтируется, на его месте планируется развитие к 2020 году комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider Activity) [202], опирающегося на построенный в 1987-1992 году ускоритель тяжёлых ядер Нуклотрон, рассчитанный на энергию 7 ГэВ/нуклон.



Рисунок 204: Комплекс зданий Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина ОИЯИ (Дубна). Из брошюры проекта NICA с сайта [202].

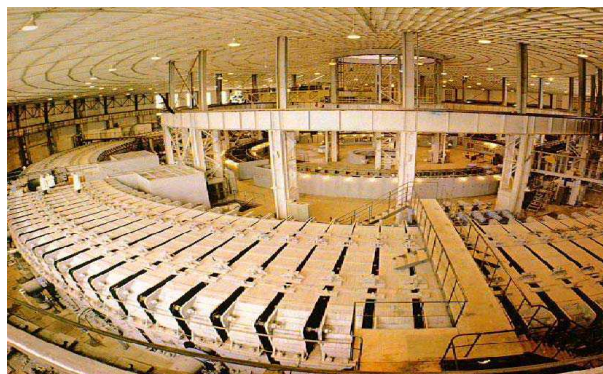


Рисунок 205: Синхрофазотрон ОИЯИ. Из брошюры проекта NICA с сайта [202].



Рисунок 206: Нуклотрон ОИЯИ. Из брошюры проекта NICA с сайта [202]

Нуклотрон смонтирован в туннеле вокруг разобранного синхрофазотрона. Он является синхротроном со сверхпроводящей магнитной системой. В дальнейшем планируется (с 2016) строительство на его базе сверхпроводящего коллайдера тяжёлых ядер, на котором планируется осуществлять столкновение высокоэнергетичных встречных пучков вплоть до золота с энергией столкновения до 11 ГэВ/нуклон.

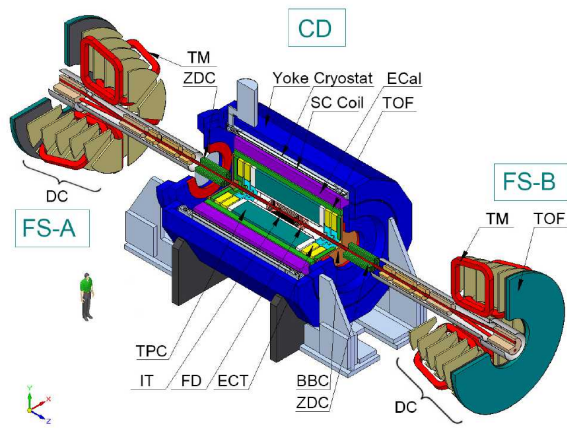


Рисунок 207: Схема проектируемого многоцелевого детектора MPD комплекса NICA. Из брошюры проекта NICA с сайта [202].

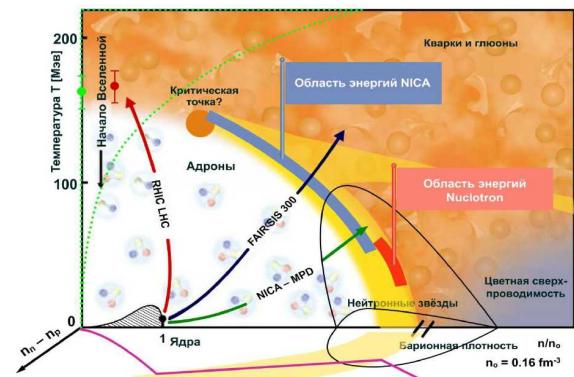


Рисунок 208: Фазовая диаграмма "плотность-энергия" состояния материи и области, доступные для проектов ОИЯИ Нуклотрон и NICA. Из брошюры проекта NICA с сайта [202].

Нуклотрон не конкурирует с БАК в области больших энергий. Целью проекта Нуклотрон и проекта NICA является создание при столкновениях большей плотности ядерного вещества за счёт использования тяжёлых ядер (рисунок 208).

Кроме этого в ОИЯИ на основе старого пятиметрового синхроциклотрона (с которого и начинался центр ОИЯИ) в 1979-1984 построен протонный фазотрон с энергией 660 МэВ [203]. На базе фазотрона образовался медико-клинический комплекс для протонной лучевой терапии.



Рисунок 209: Фазотрон ОИЯИ. С сайта [203].

Ещё одним направлением деятельности ОИЯИ является исследование свойств тяжёлых ядер и, наиболее «публичная» часть таких исследований, синтез новых элементов. Эти эксперименты проводятся на циклотронах У-400 и У-400М [204]. К наиболее значимым результатам относится синтез сверхтяжёлых элементов вплоть до $Z=118$ и установление химических свойств некоторых из этих элементов. В честь этих многолетних продуктивных исследований 105 элемент периодической таблицы (открытый независимо в Дубне и Беркли) с 1997 официально называется «дубний».



Рисунок 210: Зал циклотрона У-400 ОИЯИ. С сайта [204].

Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера, Новосибирск.

Третьим рассматриваемым нами центром ядерной физики в России является Новосибирск, где расположен крупнейший институт РАН: Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН [205][206]. В институте действует несколько электрон-позитронных коллайдеров, самый крупный из которых ВЭПП-4М (длина кольца 366 метров) ускоряет электроны и позитроны до 6 ГэВ. Кроме этого, на базе перепрофилированного синхротрона предыдущего поколения ВЭПП-3, действует Сибирский центр синхротронного излучения.

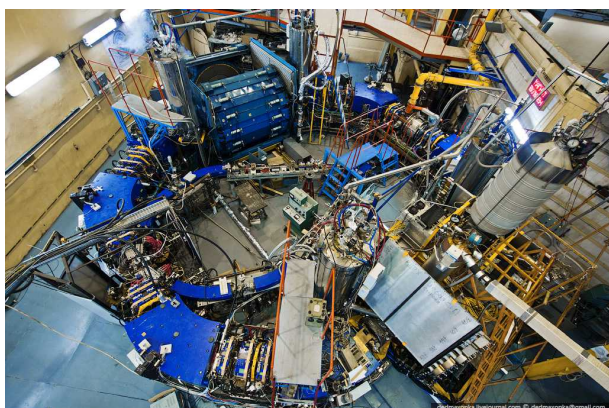


Рисунок 211: Зал электронного синхротрона на 1ГэВ ВЭПП-2000. ИЯФ СО РАН. С сайта [206].

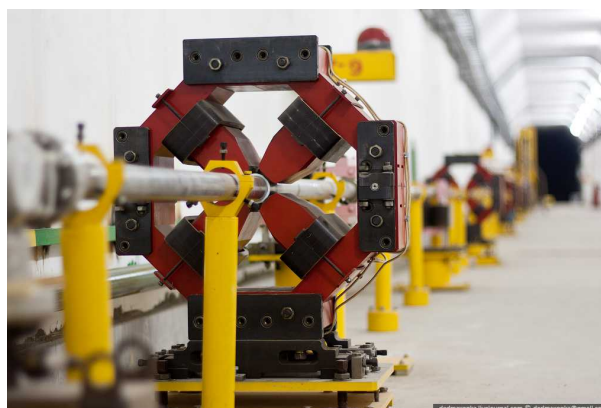


Рисунок 212: Канал электронов от инжектора к ВЭПП-3, виден фокусирующий магнит. ИЯФ СО РАН. С сайта [206].



Рисунок 213: Тоннель синхротрона ВЭПП-4М. ИЯФ СО РАН. С сайта [206].

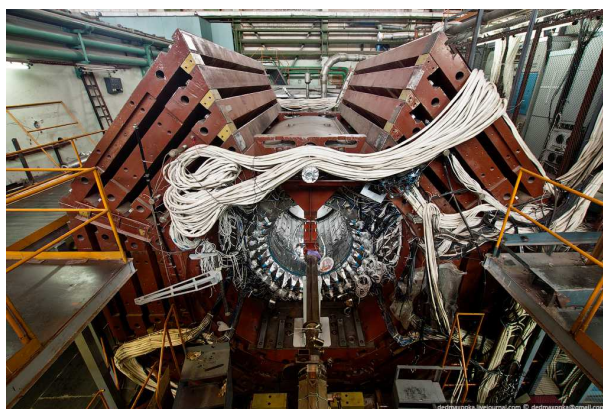


Рисунок 214: Детектор частиц КЕДР. ИЯФ СО РАН. С сайта [206].



Рисунок 215: Один из первых в мире электрон-электронных коллайдеров ВЭП-1. Единственный в мире ускоритель, в котором пучки вращались в вертикальной плоскости. Энергия пучка 160 МэВ. Работал с 1963 по 1968 годы, сейчас - музейный экспонат. ИЯФ СО РАН. С сайта [206].

Нейтринные эксперименты.

Получение и детектирование нейтрино являются одними из самых необычных экспериментов в ядерной физике. Из-за того, что нейтрино участвуют лишь в процессах гравитационного и слабого взаимодействия, их взаимодействие с веществом крайне слабо: нейтрино рождённые в ядре Солнца без потерь долетают до Земли, пронизывают Землю и летят дальше. Плотность потока солнечных нейтрино составляет на Земле около $6 \cdot 10^{10} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{сек)}$, то есть каждую секунду через каждого человека пролетают миллиарды нейтрино.

Поэтому для детектирования нейтрино приходится использовать огромные по размеру детекторы (например, в уже упоминавшемся детекторе нейтринной обсерватории в Садберри [160] в детекторе находится 1000 тонн тяжёлой воды, рисунок 148), и при этом всё равно количество детектируемых событий (обнаружение нейтрино нужных энергий) иногда исчисляется десятком за год наблюдений.

Рассмотрим подробнее два недавних эксперимента по нейтринной физике: «лабораторное» измерение эффекта осцилляций нейтрино в расположенном в Японии эксперименте T2K и измерение скорости нейтрино в нашумевшем в прессе эксперименте OPERA (ЦЕРН).

T2K (Япония). Исследование осцилляций нейтрино.

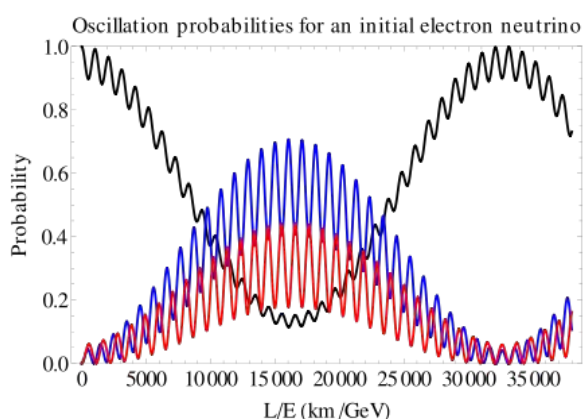


Рисунок 216: Модельный расчёт вероятности обнаружения мюонного (голубая кривая) и тау-нейтрино (красная) в потоке изначально чисто электронных (черная) нейтрино как функции параметра L/E . С сайта [207].



Рисунок 217: Положение исходной и конечной точек эксперимента T2K (Tokai to Kamioka). С сайта <http://t2k-experiment.org/t2k/>

Эффект осцилляции нейтрино [207] был предложен теоретически Б.Пантекорво в 1957 году. Этот эффект связан с необычным квантовым свойством частиц: если частица находится в состоянии, являющемся квантовомеханической «смесью» двух состояний с разным значениями какого-то параметра, то при измерении этого параметра будут наблюдаться периодические колебания измеряемой величины. В случае нейтрино таким параметром является аромат (электронное, мюонное или тау-нейтрино). Теория предсказывает, что для существования осцилляций необходимо, чтобы у нейтрино были массы, причём различные для всех трёх типов нейтрино. Первые экспериментальные доказательства пришли из

наблюдений за солнечными нейтрино (проблема солнечных нейтрино [208]), показавших что часть электронных нейтрино, образующихся в протон-протонной реакции, по пути от Солнца до Земли превращается в нейтрино других типов. После этого естественно встал вопрос в измерении эффекта осцилляций в контролируемом «лабораторном» эксперименте.

Такой эксперимент ставился в нескольких лабораториях (MINOS [209] с источником нейтрино в Фермилаб и детектором в 735 км в Миннесоте; OPERA [210] с источником нейтрино в ЦЕРН и детектором в 730 км в Гран-Сассо (Италия); T2K [211] с источником нейтрино в Токай и детектором Супер-Камиоканде [212] в 295 км от источника) и все эксперименты пришли к выводу о подтверждении эффекта нейтринных осцилляций.

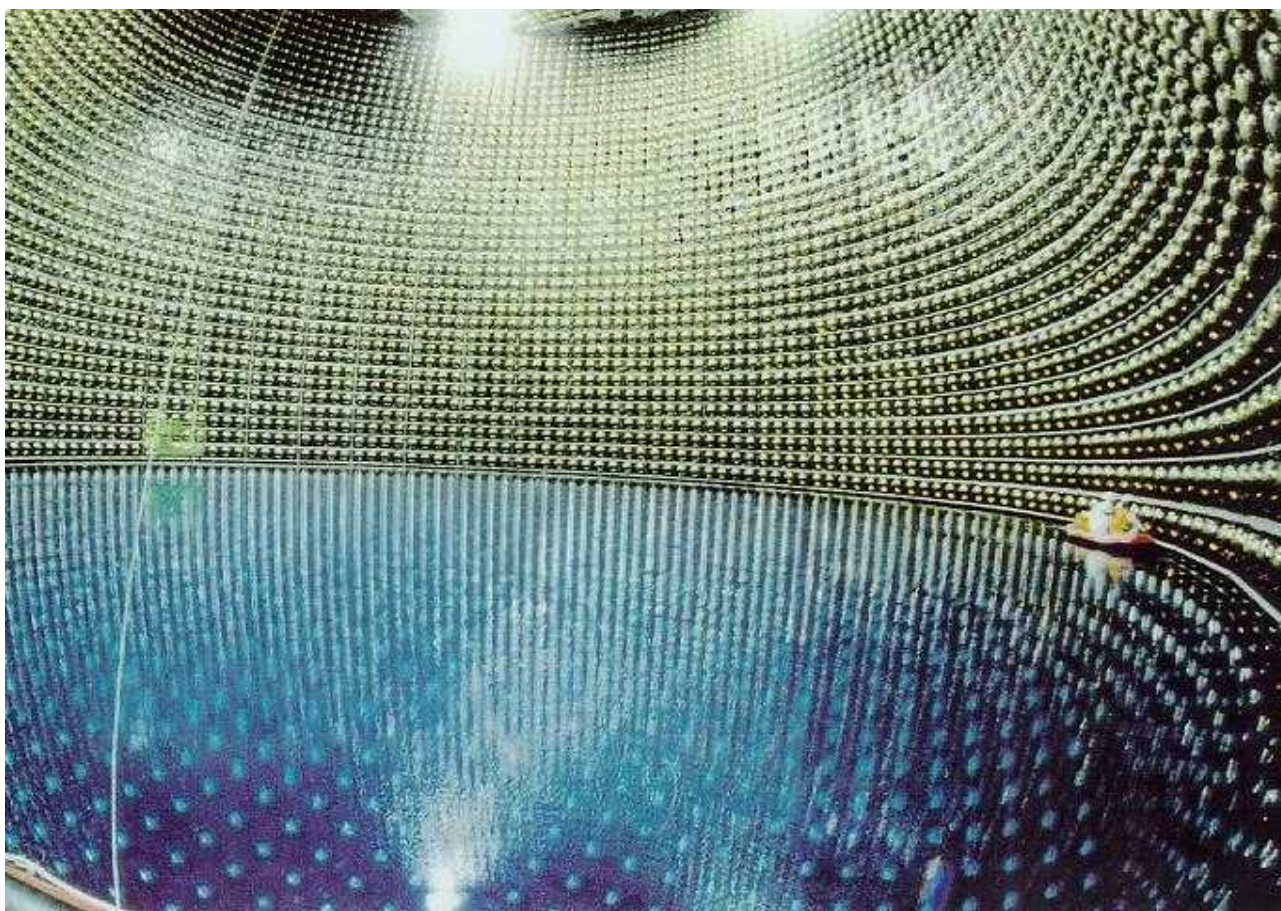


Рисунок 218: Частично заполненный водой детектор Супер-Камиоканде. С сайта [212].

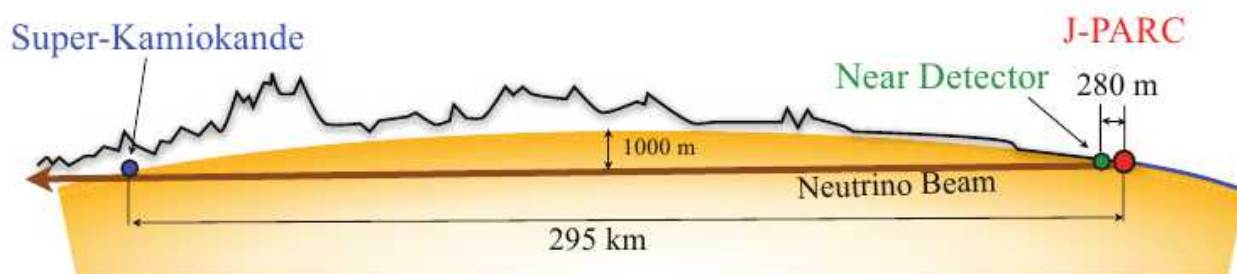


Рисунок 219: Направление пучка нейтрино в эксперименте T2K (с сайта [211]).

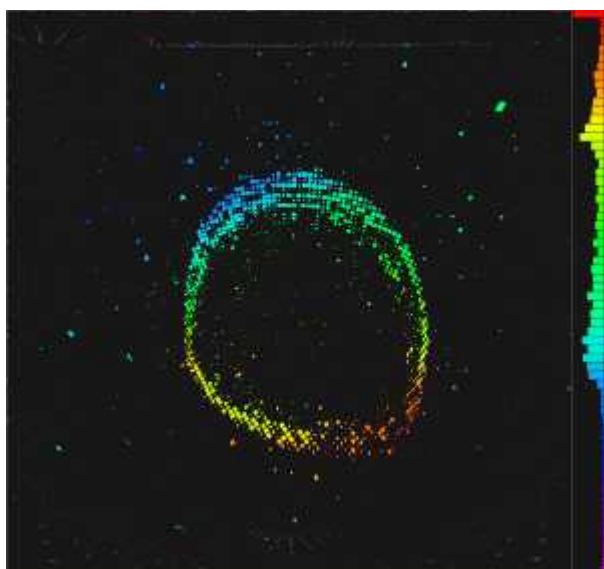


Рисунок 221: Характерное кольцо черенковского излучения от мюона. С сайта [211].

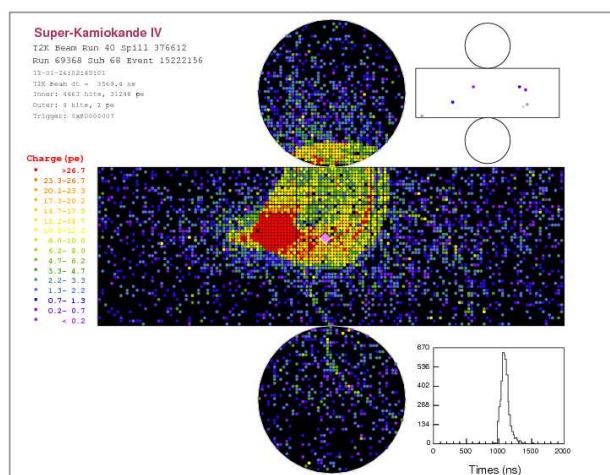


Рисунок 220: Обнаружение мюонного нейтрино детекторе Супер-Камиоканде. Первое мюонное нейтрино эксперимента T2K обнаруженное после приостановке эксперимента из-за землетрясения и цунами 2011 года. С сайта [211]

Эксперимент T2K проводится в Японии международной группой, в составе которой есть и Россия. Детектор и источник нейтрино были разнесены на 295 километров (рисунок 219).

В качестве детектора используется знаменитый детектор Супер-Камиоканде (рисунок 218). В детекторе Супер-Камиоканде находится 50000 тонн чистой воды, заключённых в цилиндрический сосуд высотой 41.4 метра и диаметром 39.3 метра, окружённый 11200 фотоэлектронными умножителями для детектирования всплеск черенковского излучения. Детектор находится на глубине 1000 метров под землёй. Взаимодействие нейтрино с электроном может привести к образованию частицы, движущейся быстрее скорости света в среде, которая теряет энергию характерным черенковским излучением. Этой частицей может быть либо электрон, выбитый из молекулы, либо мюон, образующийся при взаимодействии мюонного нейтрино с протоном или нейтроном. По анализу этого излучения можно восстановить направление движения, энергию и тип нейтрино.

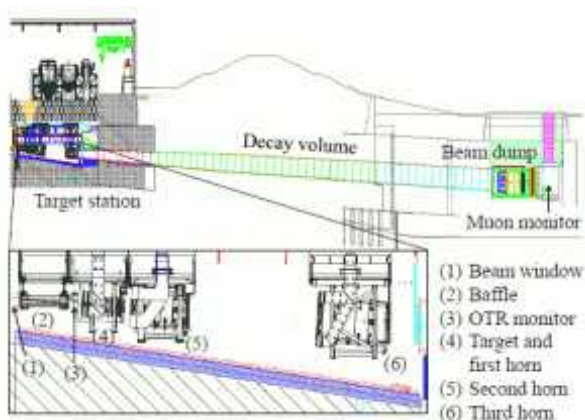


Рисунок 222: Схема источника нейтрино в эксперименте T2K. С сайта [211].

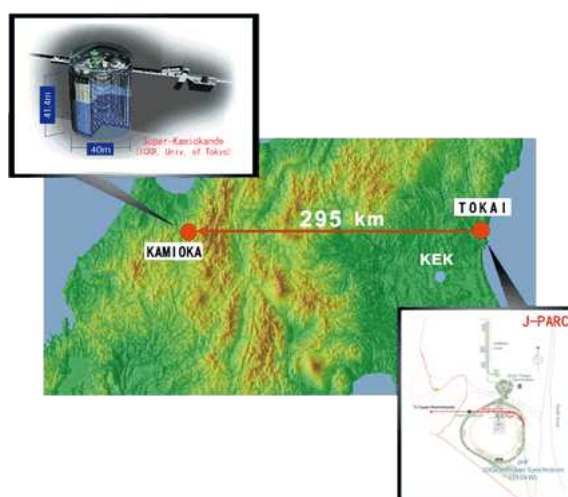


Рисунок 223: Карта расположения детектора и нейтринного источника в эксперименте T2K. С сайта [211].

В эксперименте T2K источником мюонных нейтрино являлся распад производимых на протонном ускорительном комплексе J-PARC (Japan Proton Accelerator Complex) пионов (рисунок 222). Максимальная энергия пучка протонов в главном кольце синхротрона J-PARC составляет 50 ГэВ.

Пучок протонов бомбардирует мишень, в которой образуются положительные и отрицательные пионы. При помощи магнитной фокусирующей системы отбираются пионы нужного знака (положительные для получения нейтрино, отрицательные для получения антинейтрино) и направляются в распадный тоннель (decay volume). Пионы распадаются с вероятностью 0.999877 на мюон соответствующего знака и мюонное нейтрино или антинейтрино ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) за время 0.026 мксек. Мюоны в свою очередь распадаются на электрон (позитрон) и электронное и мюонное нейтрино ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$) за 2.2 мксек. Для обеспечения «моноароматности» пучка нейтрино длина распадного тоннеля подбирается так, что все почти все пионы распадаются в нём, а мюоны долетают до конца и тормозятся в стенке. При распаде быстрых пионов в силу законов сохранения поток нейтрино оказывается направлен в основном в направлении пучка, а при распаде остановившихся мюонов получается равномерное распределение их нейтрино по направлениям. Длина распадного тоннеля в эксперименте T2K составляет 96 метров (свет проходит за время распада пиона всего 7.8 метра, в 10 раз большая длина связана с релятивистским замедлением времени в движущейся системе отсчёта). В результате, J-PARC является источником почти чистого потока мюонных нейтрино, направленных на детектор Супер-Камиоканде.

Из-за эффекта нейтринных осцилляций часть мюонных нейтрино «превратится» в нейтрино других ароматов по достижении детектора. Таким образом, измеряемой величиной для проверки эффекта осцилляций является ослабление потока нейтрино по сравнению с ожидаемым. И эксперимент действительно показал исчезновение нейтрино [213]: за период с января 2010 по март 2011 ожидалось обнаружение 104 мюонных нейтрино, а было обнаружено всего 31. Эксперимент был прерван из-за землетрясения и цунами 2011 года, но в 2012 году он вновь начал работу и изучение свойств нейтрино продолжилось.

Одним из параметров, определяемых из измерения нейтринных осцилляций является разность масс нейтрино. Например, для мюонного и тау-нейтрино разность масс составляет $|\Delta m_{23}| \sim 0.05 \text{ эВ}$. Для сравнения отметим, что даже для электронного нейтрино экспериментально полученная верхняя оценка массы составляет $\sim 2 \text{ эВ}$ (для мюонного 0.2 МэВ, для тау-нейтрино 15 МэВ), то есть вопрос о точном определении массы нейтрино остаётся открытым (и видимо останется ещё надолго).

OPERA (ЦЕРН). Измерение скорости нейтрино.

Если у нейтрино есть масса, то, согласно теории относительности, они должны двигаться медленнее чем скорость света. Однако международная коллаборация OPERA [210], базирующаяся в ЦЕРН, в 2011 году вошла в мировые новости сообщением об измерении превышения скорости движения нейтрино над скоростью света [214]. Подобное сообщение конечно вызвало большой резонанс, однако ввиду большой сложности поставленного эксперимента научное сообщество восприняло его скептически, подозревая наличие неучтённых факторов. По состоянию на февраль 2012 года коллаборация OPERA сообщила об обнаружении двух неучтённых технических проблем в системе измерения времени, которые дают эффект порядка наблюдаемого отклонения. В марте 2012 года коллаборация ICARUS, использующая тот же поток нейтрино, но другой детектор, не обнаружила существенного отклонения скорости нейтрино от скорости света. В конце марта спикер коллаборации А.Эридигато и координатор физической программы Д.Отьеро подали в отставку.

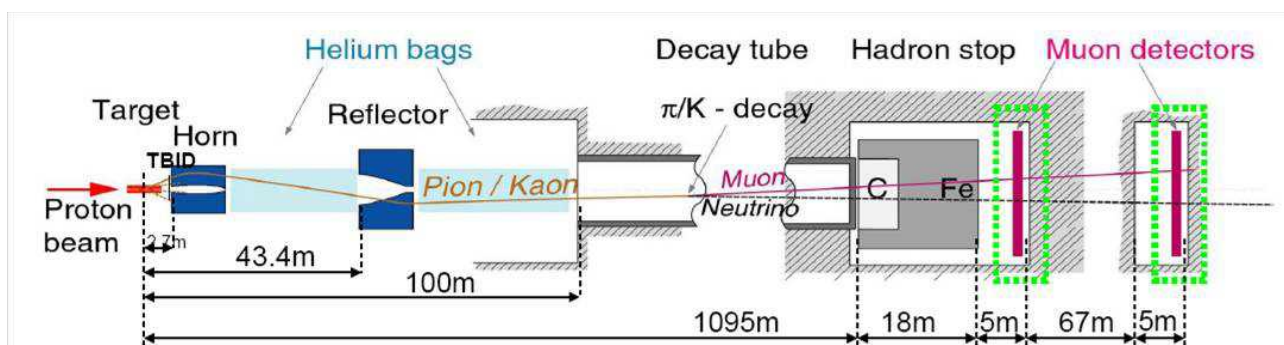


Рисунок 224: Характерные размеры распадного тоннеля. Из публикации [214].

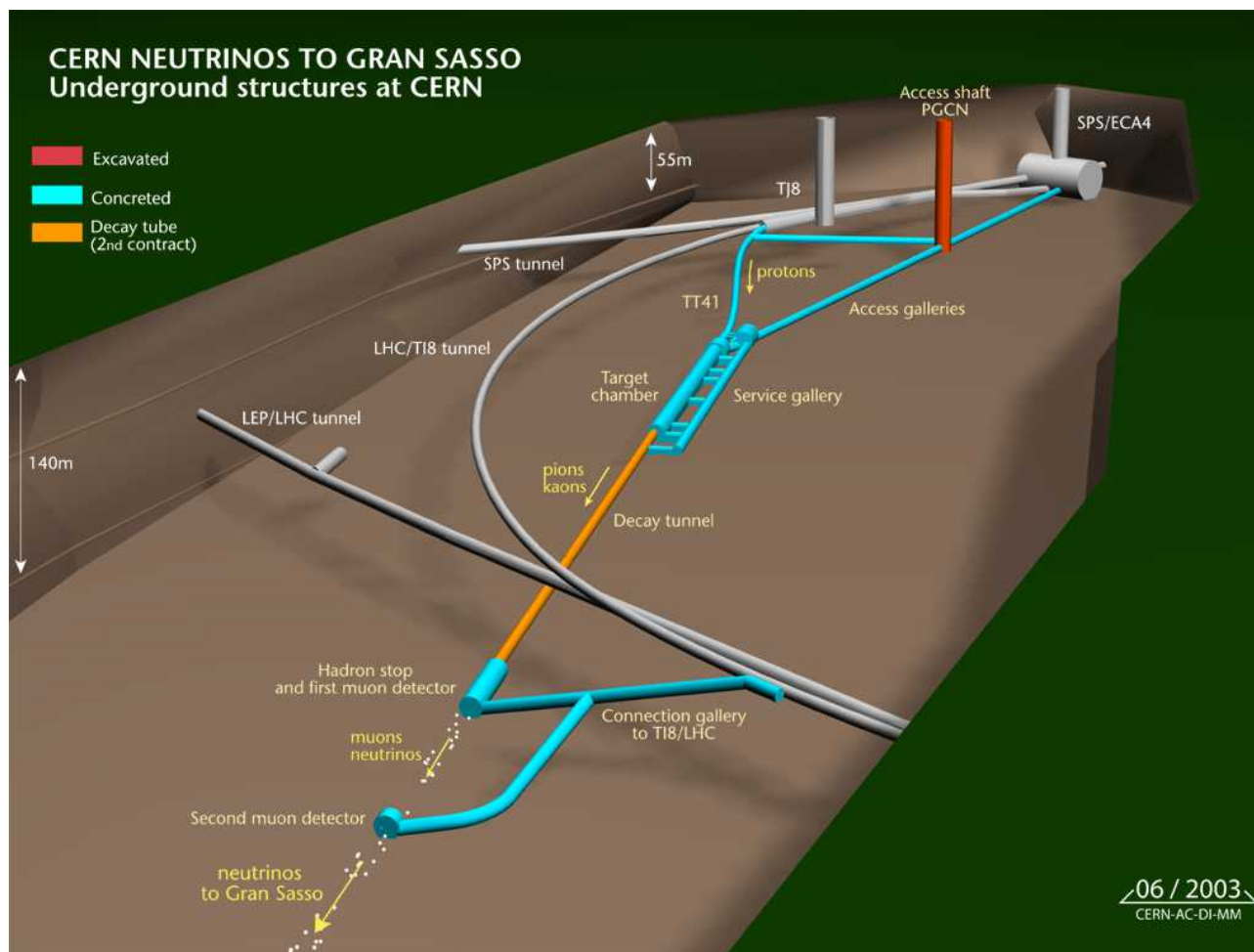


Рисунок 225: Источник нейтрино в ЦЕРН. Из публикации [214].

История измерения скорости нейтрино такова:

- В 1970-х годах в лаборатории Фермилаб провела ряд экспериментов по измерению скорости нейтрино, образующихся при распаде пионов и каонов, получаемых на 400 ГэВ-ном протонном ускорителе. По результатам этих экспериментов отличие скорости нейтрино от скорости света $\left| \frac{c-V}{c} \right| < 4 \cdot 10^{-5}$. Эти измерения были косвенными, определялось размытие пучка нейтрино за время их следования к детектору.
- В 1987 году при наблюдении сверхновой, взорвавшейся на расстоянии 157000 ± 16000 световых лет обнаружилось, что нейтрино пришли к Земле на 3 часа раньше световой

вспышки, это даёт оценку $\left| \frac{c-V}{c} \right| < 2 \cdot 10^{-9}$. Более раннее прибытие нейтринного импульса объясняется тем, что световой импульс был задержан в процессах переизлучения во внешних оболочках сверхновой, в то время как почти не взаимодействующие нейтрино прошли без задержек.

- В 2007 году в эксперименте MINOS (Фермилаб) было сделано первое непосредственное измерение скорости нейтрино с измерительной базой 734 километра. Результат этих измерений $-2.4 \cdot 10^{-5} < \frac{V-c}{c} < 12.6 \cdot 10^{-5}$
- В 2011 году эксперимент OPERA (ЦЕРН) обнаружил прибытие нейтрино на 60 нсек раньше (на измерительной базе 730 км), чем ожидалось, что приводило к оценке $\frac{V-c}{c} = (2.37 \pm 0.32(\text{стат.})_{-0.24}^{+0.34}(\text{сист.})) \cdot 10^{-5}$. В марте 2012 года было объявлено, что имелась ошибка в одном из кабельных соединений, эквивалентная кажущемуся «ускорению» прибытия нейтрино на 73 нсек.
- В 2012 году эксперимент ICARUS (тот же пучок нейтрино, что и OPERA) показал, что различие между наблюдаемым и ожидаемым временем прибытия составляет $\delta t = 0.3 \pm 4.0(\text{стат.}) \pm 9.0(\text{сист.}) \text{ нсек}$.

Ожидается, что новые измерения смогут получить ещё более точные результаты.

Рассмотрим вкратце схему организации действительно сложного эксперимента OPERA. Сначала оценим с какой точностью должно быть измерено расстояние от источника нейтрино до детектора, чтобы заметить опережение на 60 нсек. Свет проходит за 60 нсек 18 метров. Следовательно, расстояние между точкой появления нейтрино и детектором (730 км, через горы) должно быть измерено с точностью несколько метров. Кроме этого, часы в точках образования нейтрино и детектирования должны быть синхронизованы с наносекундной точностью.

Источником мюонных нейтрино является, как и в эксперименте T2K, распад пионов и каонов, полученных бомбардировкой мишени ускоренными протонами. Длина распадного тоннеля (рисунок 224) составляет почти километр. То есть, хотя положение мишени и положение детектора было выяснено с точностью 20 см при помощи специальных геодезических исследований (эти исследования даже заметили сдвиг на несколько сантиметров во время землетрясения 2009 года), положение точки распада (то есть точки образования конкретного нейтрино) определено только статистически (по закону радиоактивного распада). Этот факт, однако вносит лишь небольшую поправку так как образующиеся пионы и каоны являются ультрарелятивистскими — то есть их скорость, как и скорость нейтрино близки к скорости света, так что неопределённость положения точной точки распада эквивалентна примерно 2 нсек погрешности в определении времени прибытия.

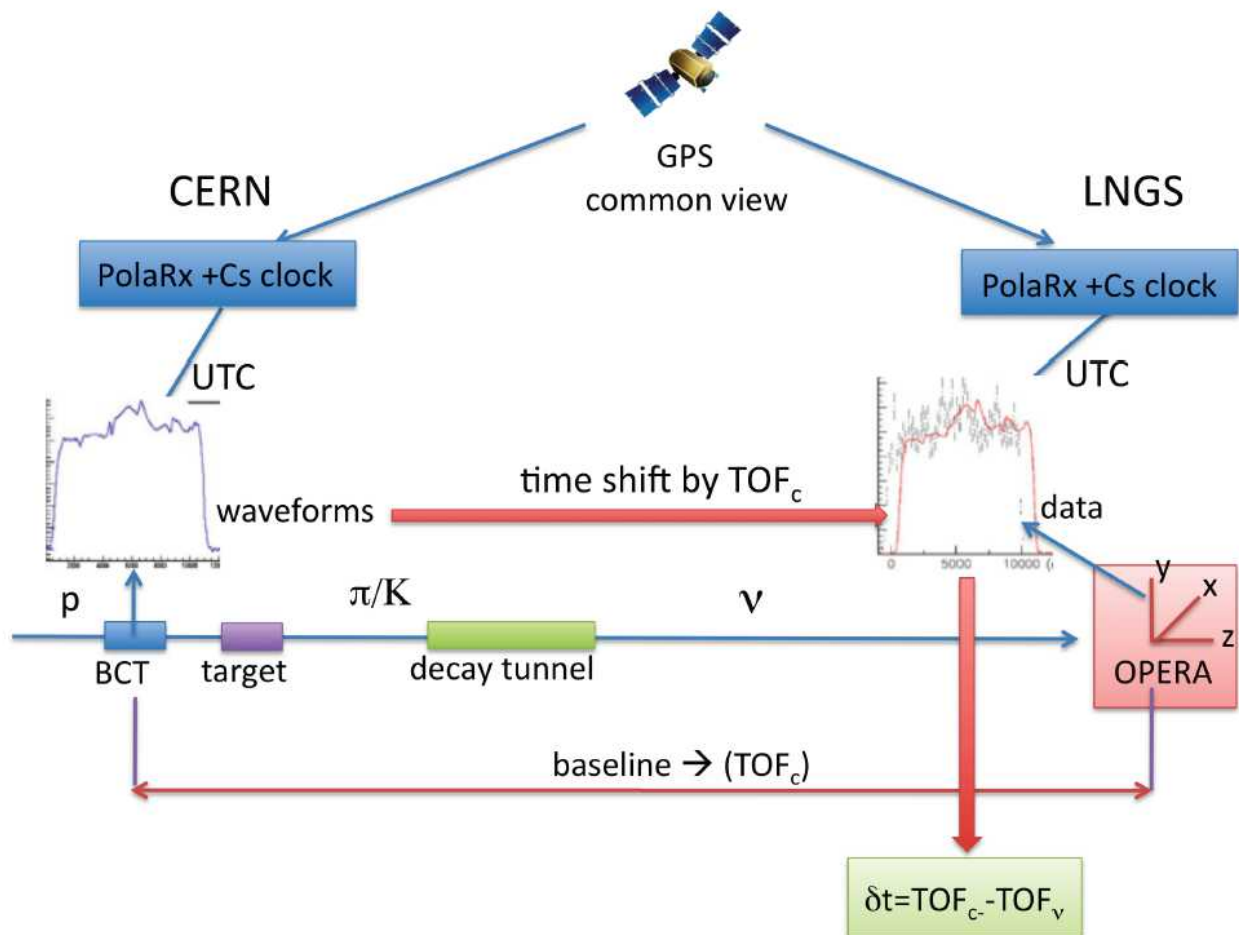


Рисунок 226: Схема определения запаздывания нейтрино. Из работы [214].

Также неопределёнными является какой именно протон породил мезон, породивший нейтрино — а протоны из ускорителя поступают импульсами длиной около 10 мксек. Для исключения этой неопределённости авторы эксперимента набирали статистику в течение трёх лет (2009-2011), за это время в мишень попало около 10^{20} протонов, а на детекторе в Гран-Сассо зарегистрировано около 15000 нейтрино. По этой статистике были восстановлены две функции распределения: функция распределения числа протонов в импульсе от времени и функция распределения детектируемых нейтрино от времени (рисунок 227).

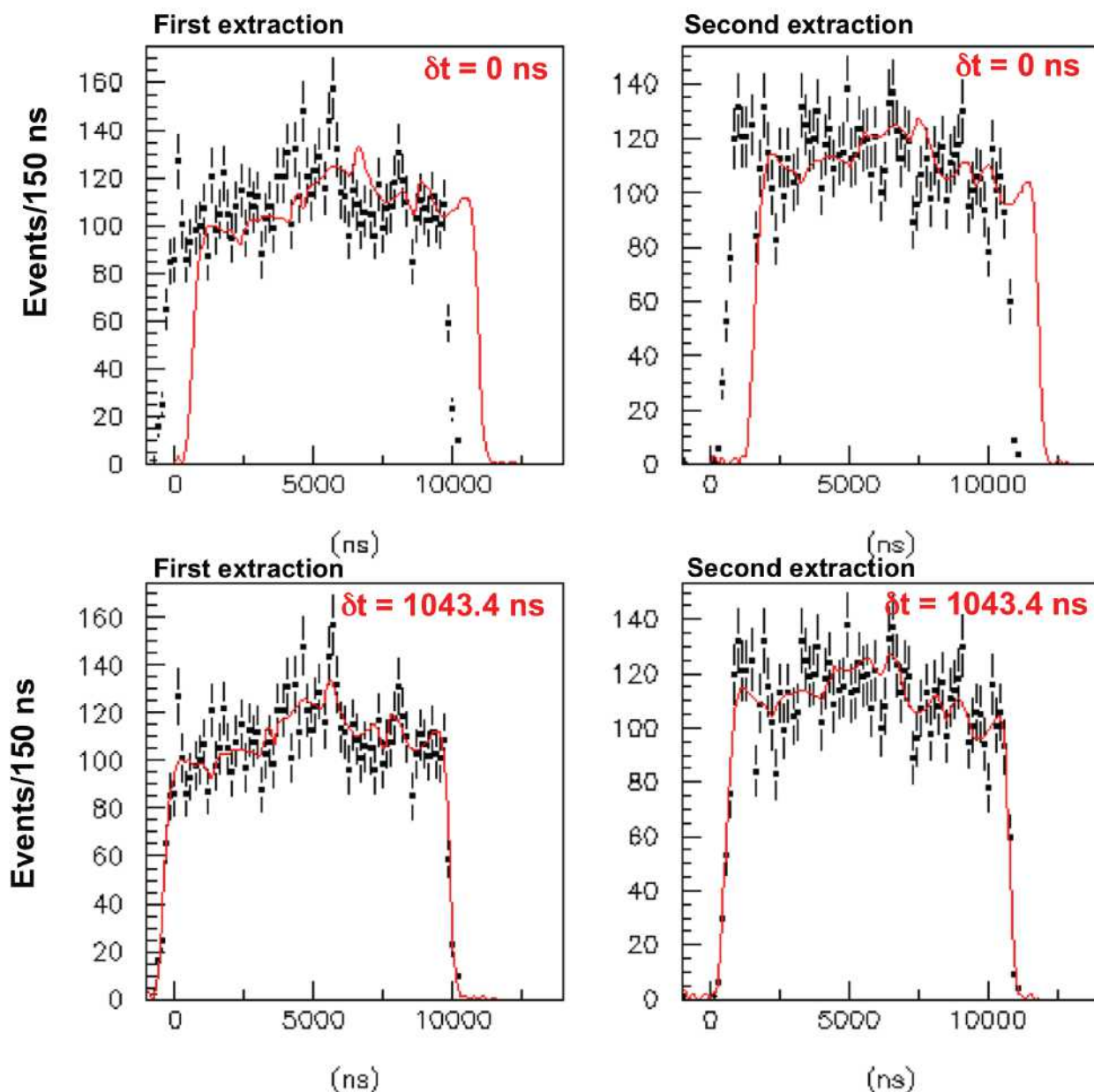


Рисунок 227: Сравнение функций распределения для протонов (красная кривая) и для нейтрино (символы) для двух выборок экспериментальных данных. На верхних рисунках - без сдвига, на нижних - с подобранным сдвигом. Из работы [214].

Сравнение этих функций распределения показало, что они подобны друг другу и смещением по оси времени и нормировкой их можно совместить. Подобранный сдвиг составил 1043 нсек, из них 986 нсек были связаны с известными авторам особенностями их техники, а оставшиеся 57 нсек являлись тем самым «опережением скорости света», всколыхнувшим весь мир.

Напомним, что позднее обнаружилось несколько неучтённых технических моментов, дающие дополнительную поправку около 70 нсек, перекрывающую эту аномалию. Таким образом, утверждение о сверхсветовой скорости нейтрино нашло своё объяснение в неточности проведённого эксперимента.