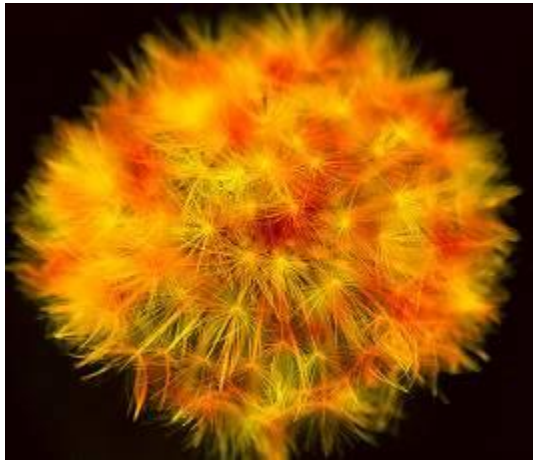
Газовый разряд
и
ядерная физика

В.Ф. Ежов

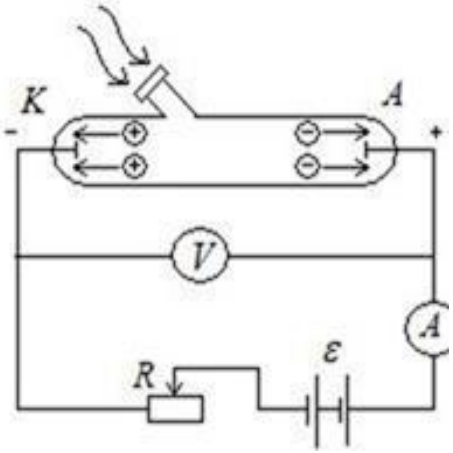
Лекция 3

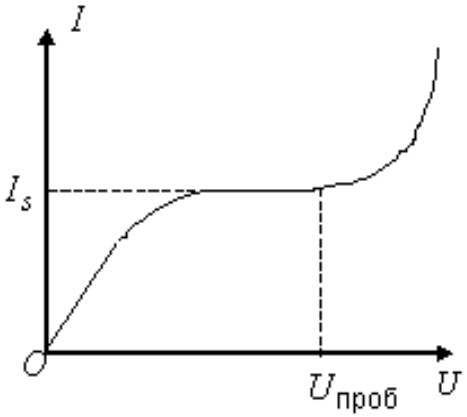
2013

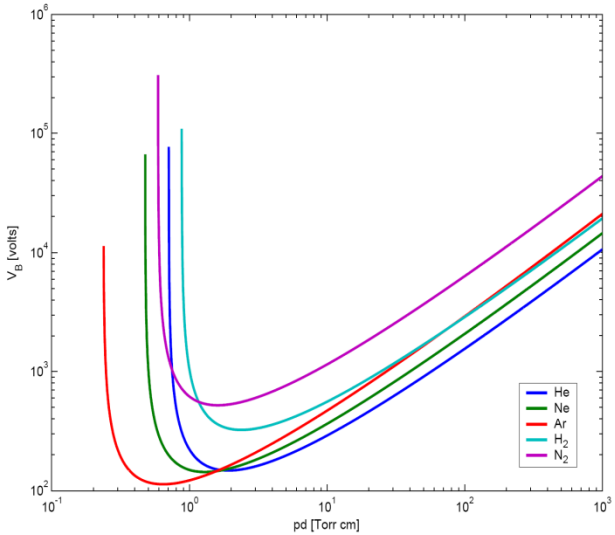
- **Газовый разряд начал изучать еще Фарадей**



- **Идея - Изучение газового разряда позволит совершить прорыв в знаниях об электричестве**

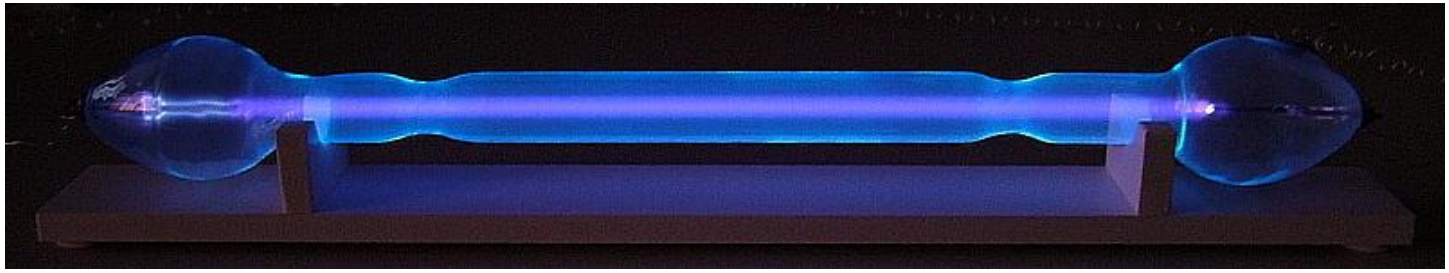






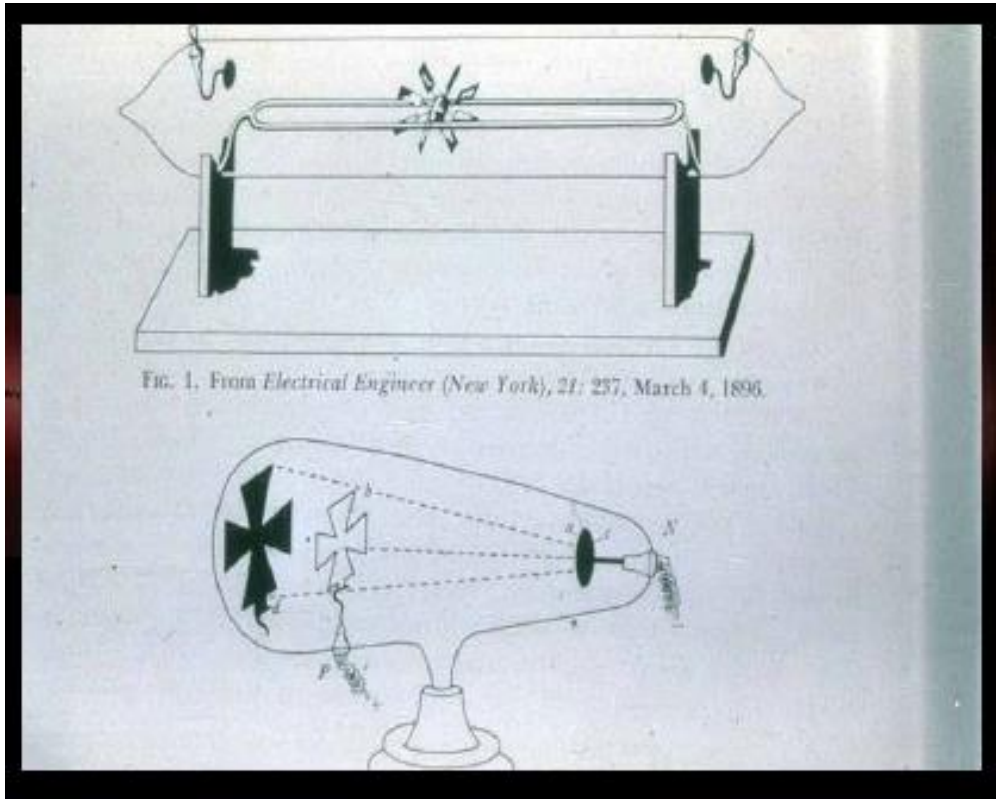
1855 немецкий изобретатель Генрих Гейсслер (Heinrich Geissler, 1815–1879) изобрел вакуумный насос, а затем разработал ртутную вакуумную трубку, в которой при очень низком давлении высоковольтный разряд между электродами порождает свечение.

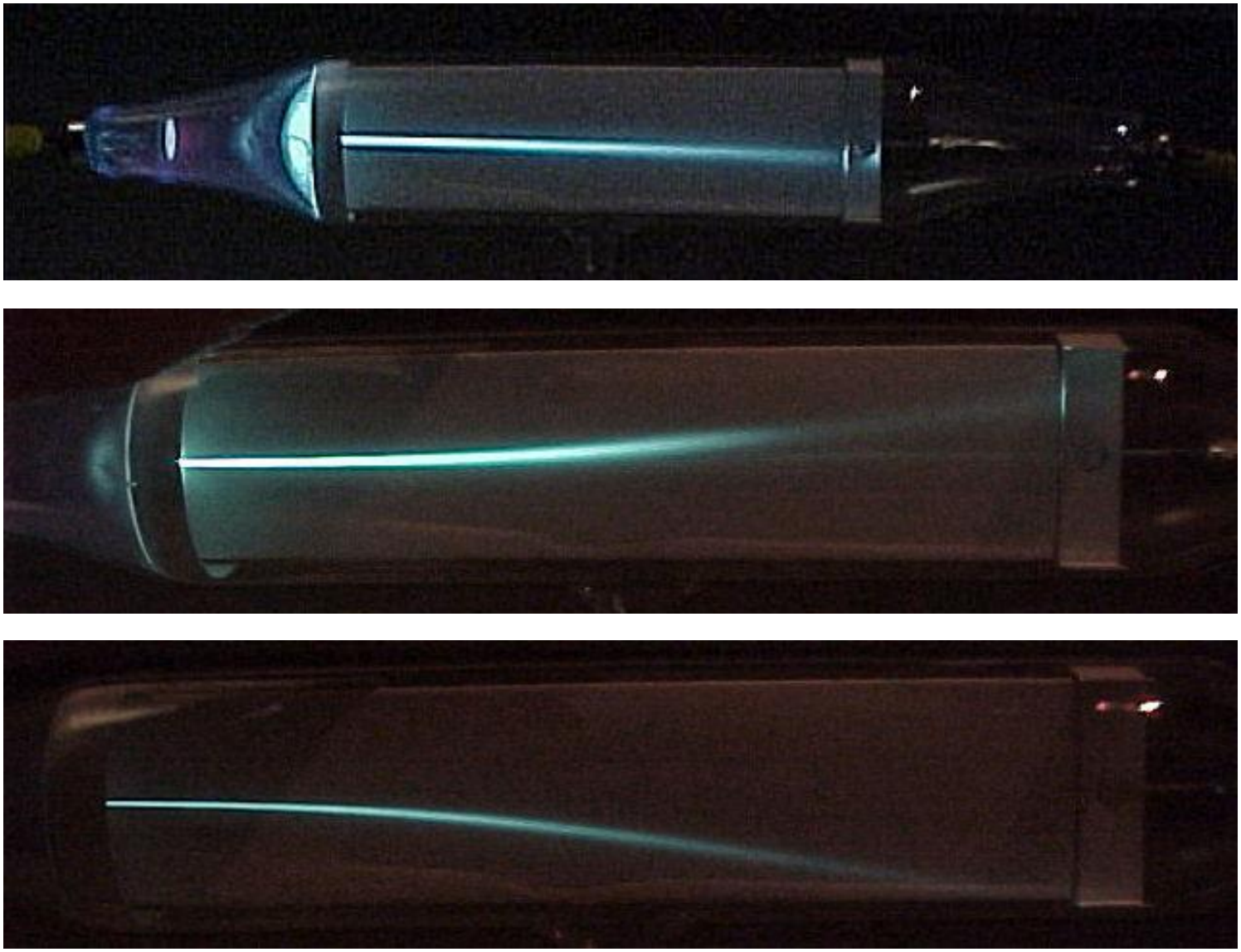
Когда экспериментаторы принялись откачивать газ из трубки до еще большего разрежения, область свечения начала распадаться на сложную последовательность отдельных светящихся слоев, цвет которых зависел от газа.



И.Гитторф (1824-1914) В 1869 При уменьшении давления до 0.0001 Торр свечение газа исчезает, стенки трубки испускают ярко-зеленое свечение.
Э. Гольдштейн (1850-1931) назвал ток, возникающий в трубке катодными лучами

Крукс с помощью усовершенствованного вакуумного насоса достиг еще большего разрежения и обнаружил, что свечение исчезло, а стенки стеклянной трубки флуоресцируют зеленоватым светом. Крукс показал, что катодные лучи испускает отрицательный электрод (помещенный внутрь трубки крестообразный предмет отбрасывал тень на противоположную стенку) и эти лучи состоят из некоторой субстанции и несут отрицательный электрический заряд (ударяясь о лопасти легкого колесика, лучи приводили его во вращение, а пучок лучей отклонялся магнитом в сторону, соответствующую отрицательному заряду). **В 1878 Крукс высказал гипотезу, что флуоресценцию вызывают лучи, когда ударяются о стеклянные стенки**.





Крукс – Герц - Ленард

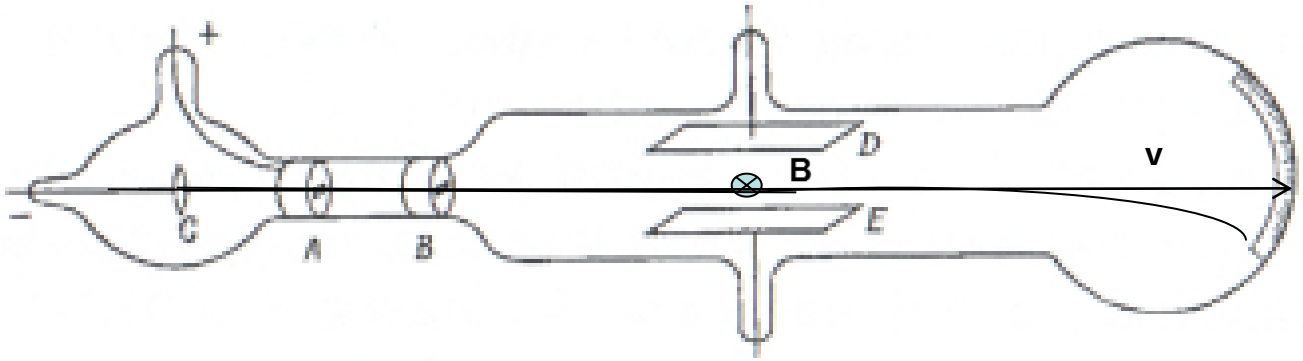
- **Крукс: катодные лучи – потоки молекул, соударявшихся с катодом и при этом получающих отрицательный заряд.**
- **Генрих Герц не смог отклонить катодные лучи электрическим полем конденсатора, расположенного вне разрядной трубки.**
- **Вывод катодные лучи – колебания эфира**
- **Герц взял вместо мальтийского креста тонкие листки различных материалов и увидел, что катодные лучи проходят сквозь них.**
- **Под микроскопом отверстий видно не было, тем не менее он составил стопку из нескольких листиков – лучи проходили насквозь.**
- **Задание Ленарду – посмотреть можно ли выпустить катодные лучи за пределы трубки? Ленард научился делать 3 мкм фольги, которые выдерживали атмосферное давление.**

Ф.Ленард (Ph. von Lenard, 1862–1947)

- Катодные лучи распространяются в воздухе на расстояния до 8 см (Пробег молекул 10^{-7} м)!
- Пробег не зависит от природы газа, а зависит от давления!
- И все равно – эфир! Открытие прошло мимо.

Дж. Дж. Томсон – открытие электрона

- Катодные лучи – эфир или корпускулы?
- Эфирная теория бесплодна, поскольку свойства эфира не известны
- Кандидатов на роль отрицательно заряженных частиц не было.



$$\begin{cases} m\ddot{x} = 0 \\ m\ddot{y} = qE \end{cases} \Rightarrow mv^2 y'' = qE \Rightarrow y = qEx^2/2mv^2$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{dx}\frac{dx}{dt}$$

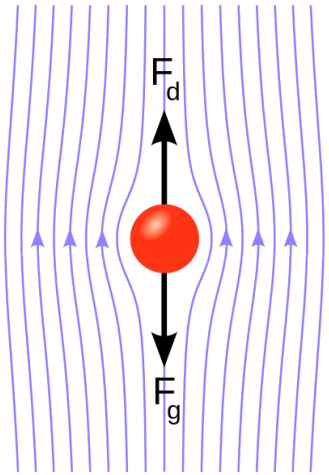
$$Y_s = \frac{qEl}{mv^2}\left(L + \frac{l}{2}\right)$$

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \longrightarrow \vec{F} = 0 \longrightarrow qE = qvB \longrightarrow v = E/B$$

$$\frac{m}{q} = \frac{B^2 l}{EY_s}\left(L + \frac{l}{2}\right)$$

Более чем в 1000 раз (1836.1527) превышает массу водорода!

Роберт Милликен – измерение заряда электрона



- **Критерий ламинарности (число Рейнольдса): при малых скоростях жидкости силы трения (пропорциональные скорости v) преобладают над силами инерции в жидкости (пропорциональными $\rho_ж v^2$)**

$$Re = \frac{\rho_ж v R}{\eta} \ll 1$$

Вес - Архимед

$$\frac{4}{3}\pi R^3(\rho_ш - \rho_ж)g = 6\pi\eta R v$$

Трение – закон Стокса

$$R \ll \frac{\eta}{\rho_ж v} \quad \Rightarrow \quad R \ll \sqrt[3]{\frac{9\eta^2}{2g\rho_ж(\rho_ш - \rho_ж)}} = 50\text{мкм}$$

1 - Скорость падения масляного шарика диаметром 1 мкм 0.1 мм/с

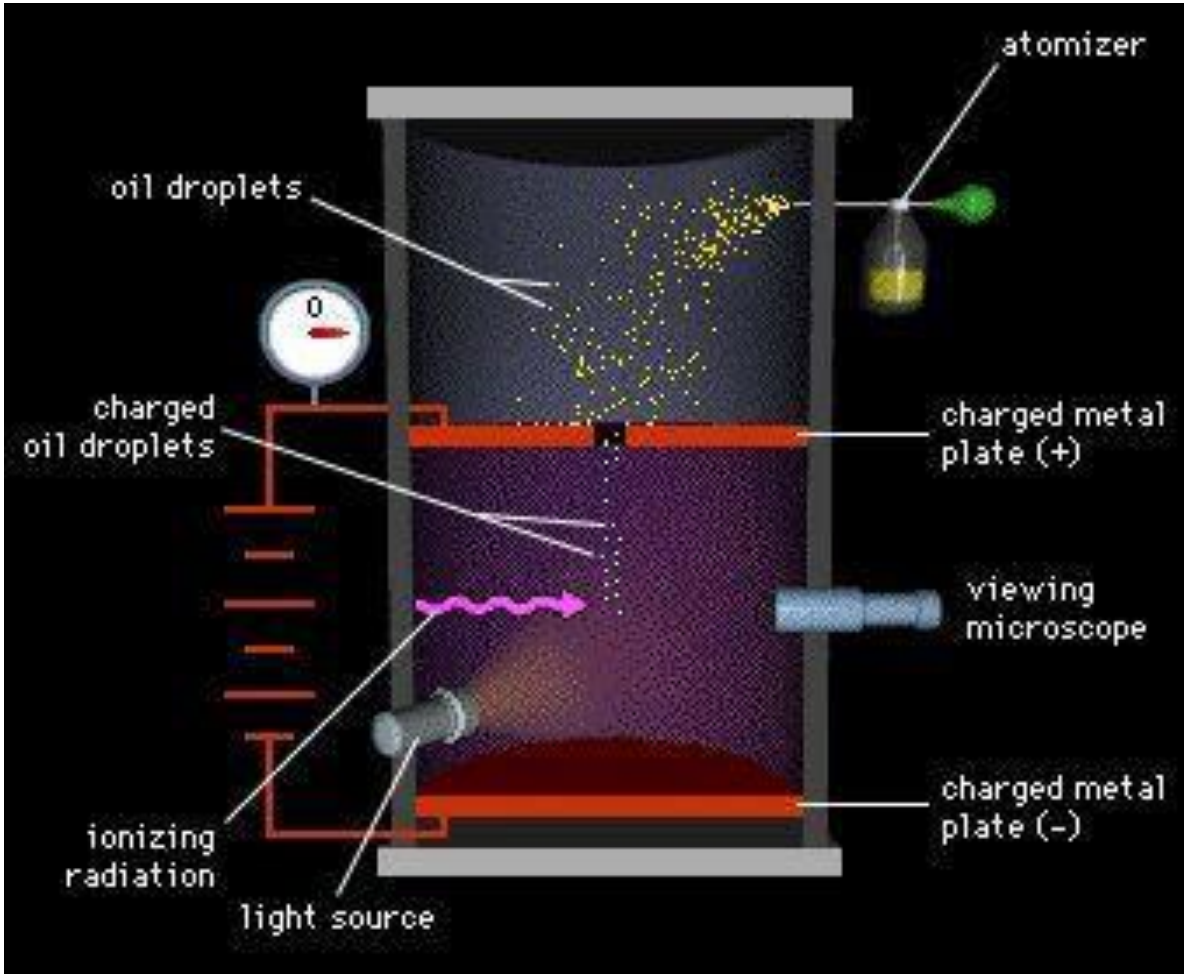
2 - Измеряя скорость падения можно измерить радиус шарика (капли)

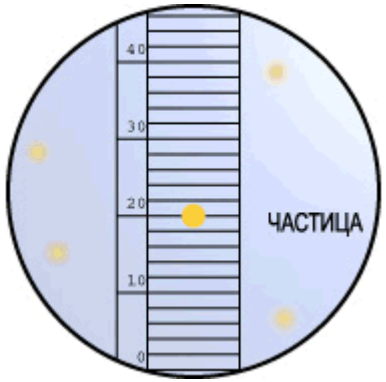
Добавим электрическое поле

$$ZeE - \frac{4}{3}\pi R^3(\rho_s - \rho_l)g = 6\pi\eta R v_E$$

$$Ze = \frac{9\sqrt{2}\pi\eta^{3/2}v^{1/2}(v + v_E)}{E(\rho_{ш} - \rho_{ж})^{1/2}g^{1/2}}$$

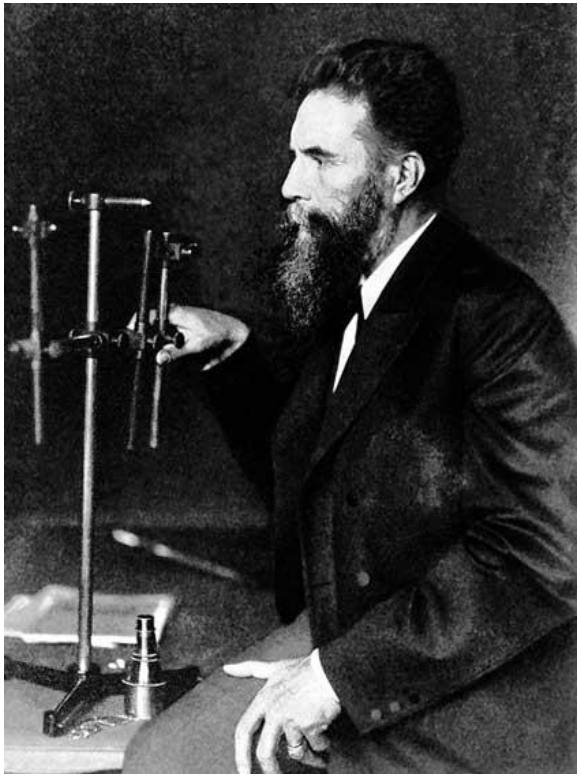
1. **Измеряем скорость без поля, определяем R**
2. **Измеряем скорость с полем, определяем Ze**





1895 *Discovery of x-ray. Wave like character*

Wilhelm Roentgen (1845-1923)



- Roentgen was one of a number of physicists who were carefully studying electric discharge in gases at low pressures.

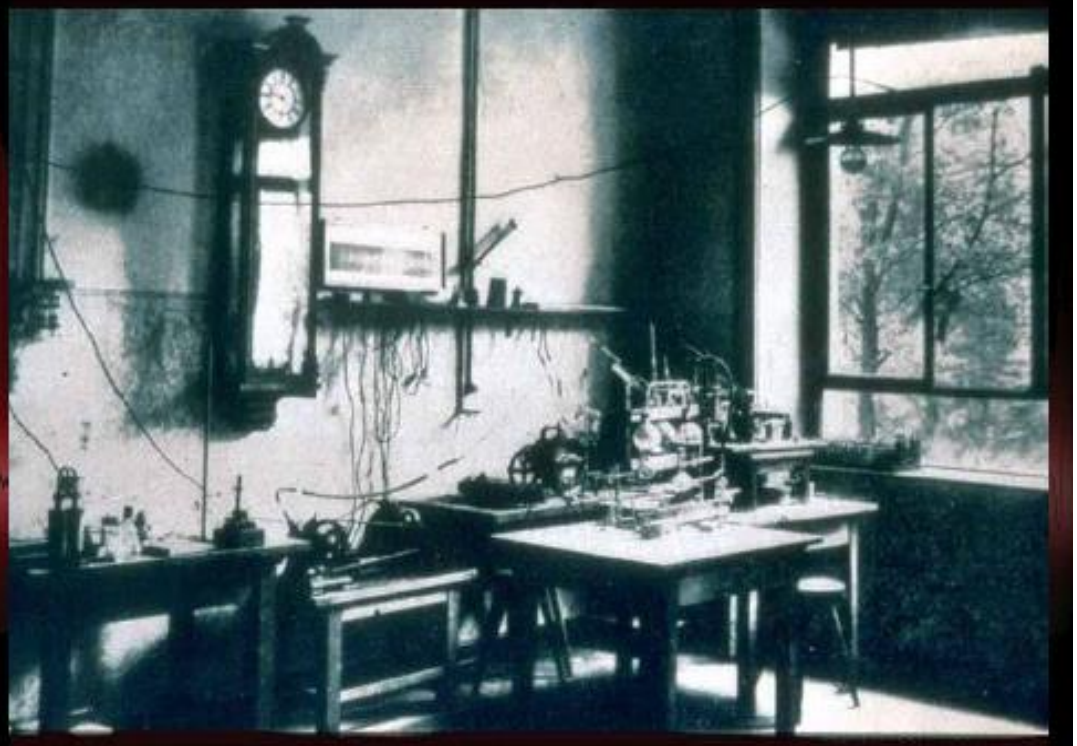
Родился 27 марта 1845 в Леннепе, небольшом городке близ Ремшейда в Пруссии, единственный ребенок в семье преуспевающего торговца текстильными товарами Фридриха Конрада Рентгена и Шарлотты Констанцы

Исключен из школы за то, что отказался назвать имя товарища, нарисовавшего карикатуру на преподавателя

в качестве вольнослушателя прослушал несколько курсов в Утрехтском университете. В 1865 Рентген зачислен студентом в Федеральный технологический институт в Цюрихе и в 1868 получил диплом.

History

Roentgen's laboratory at the Physical Institute of the University of Würzburg, Germany

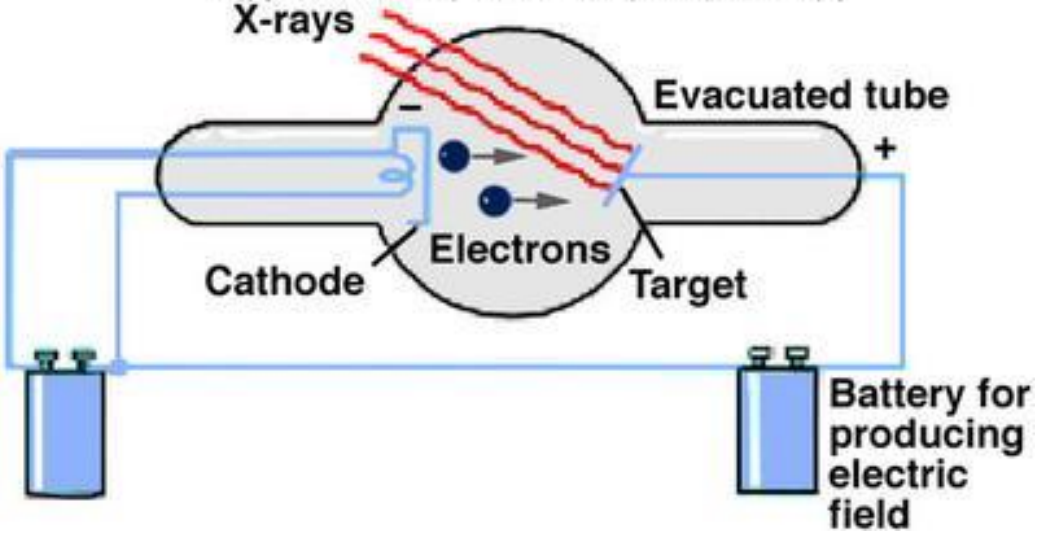


Немецкий физик Ф.Ленард показал, что катодные лучи могут проникать сквозь окошко в трубке, затянутое тонкой алюминиевой фольгой, и ионизовать воздух в непосредственной близости окошка.

Рентген повторил некоторые из более ранних экспериментов, в частности, показав, что исходящие из окошка Ленарда катодные лучи (тогда еще неизвестные) вызывают флуоресценцию экрана, покрытого цианоплатинитом бария.

Однажды (это случилось 8 ноября 1895) Рентген, чтобы облегчить наблюдения, затемнил комнату и обернул трубку Крукса (без окошка Ленарда) плотной непрозрачной черной бумагой. К своему удивлению, он увидел на стоявшем неподалеку экране, покрытом цианоплатинитом бария, полосу флуоресценции. Детально проанализировав результат и исключив возможные ошибки, он установил, что флуоресценция появлялась всякий раз, когда он включал трубку, что источником излучения является именно трубка, а не какая-либо другая часть цепи и что экран флуоресцировал на расстоянии даже почти двух метров от трубки, что намного превосходило возможности катодных лучей.

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



- In a short time (7 weeks) the properties listed below were confirmed by Roentgen and others.

1. X-rays make a fluorescent screen glow with visible light.

2. They blacken a photographic plate.

3. In passing through air or any gas they make the gas a conductor by producing ionsin the gas.

4.They are strongly absorbed by dense substances such as iron or lead.

5.They cast shadows of dense objects on a fluorescent screen and hence must travel in straight lines.

6.They are not deflected by either electric or magnetic fields.

Debate on the nature of x-ray

- Although properties of x-ray were confirmed by many physicists, their nature was at first vigorously debated.
- Some thought x-ray consisted of particles of extremely small dimensions. Others thought them to be a form of extremely penetrating wave motion.

- In order to determine why the x-ray showed the common properties of the light Roentgen himself tried to produce reflection refraction, polarization and diffraction. Regretfully, from these experiments he obtained only negative results.

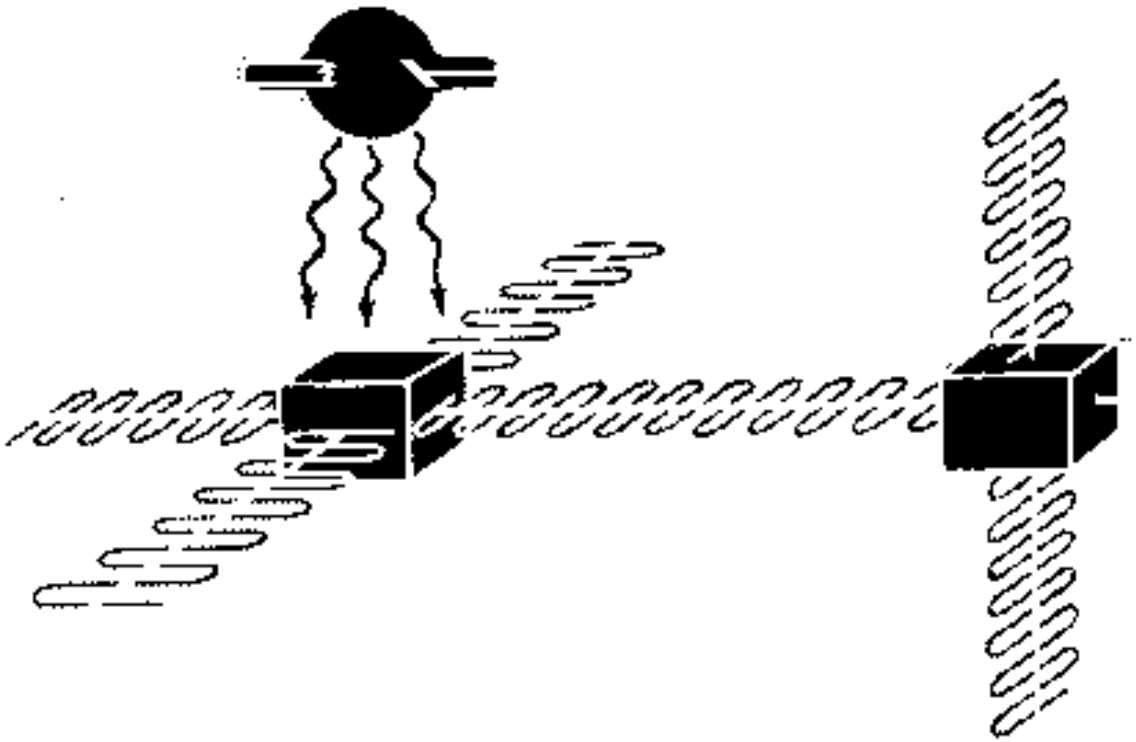
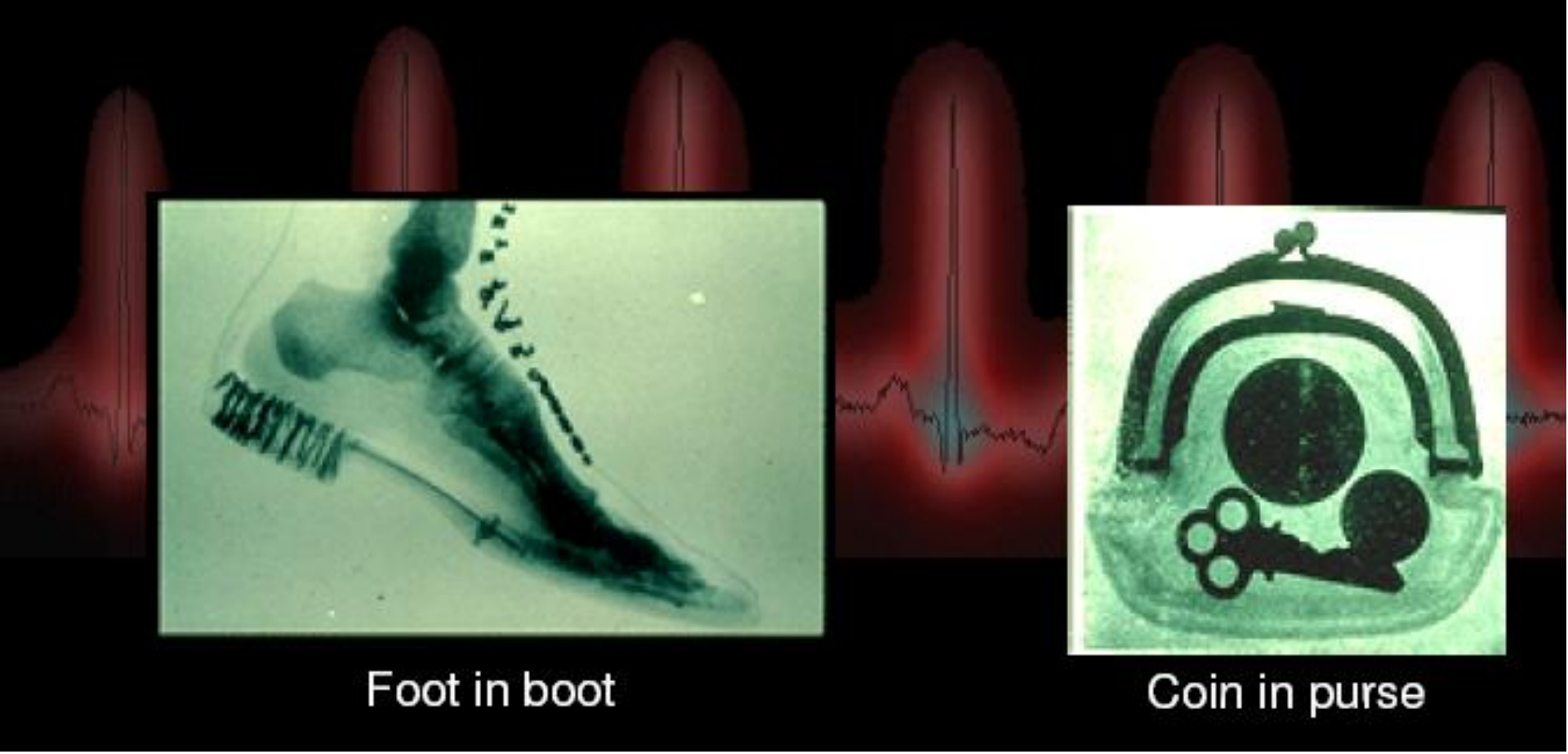


Fig. 4-1. Barkla's experiment to show that x-rays can be polarized. Rays scattered from carbon block A are scattered again from second carbon block B. Absence of scattered rays along yy' and presence along zz' indicate that vibrations are transverse and that rays incident on B are plane-polarized.

Roentgen's Big Idea

Place human tissue between cathode and viewing phosphor medium.

Wife's hand and ring

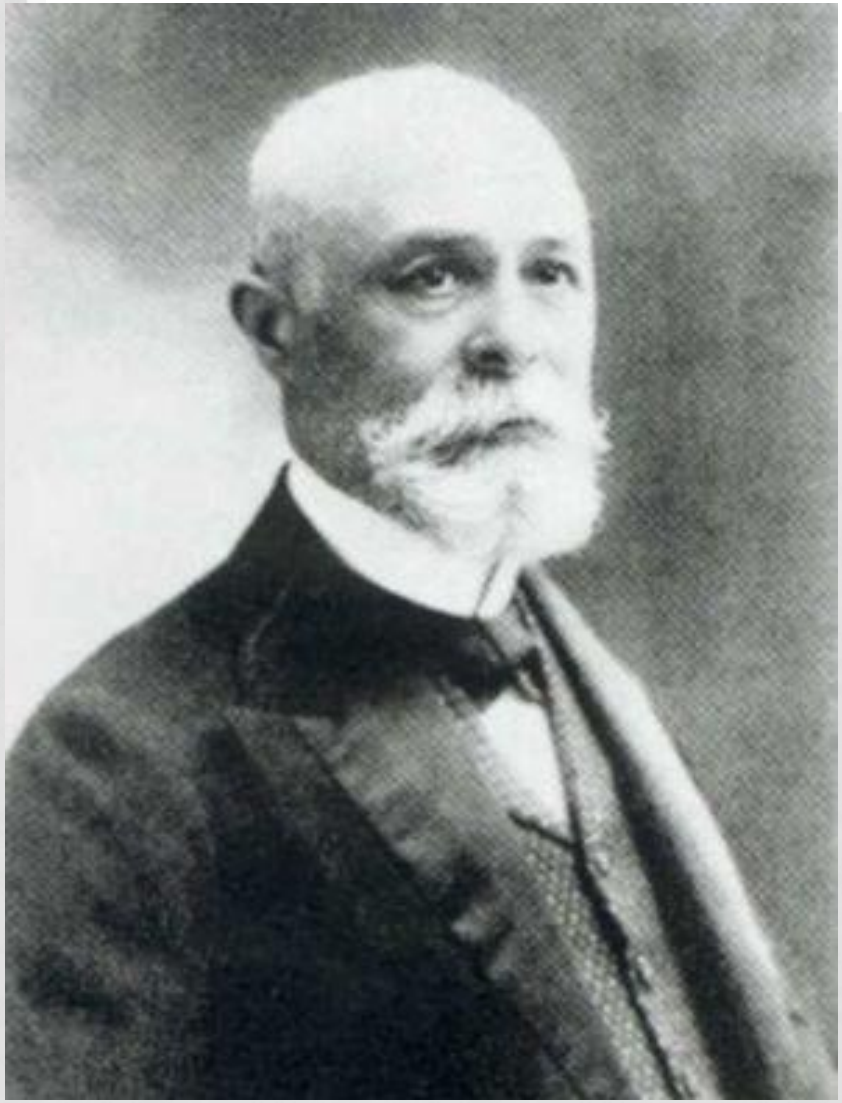


По-видимому, первым открытие Рентгена в коммерческих целях применил Т.Эдисон: в мае 1896 г. он в Нью-Йорке организовал выставку, где желающие могли разглядывать на экране изображение своих конечностей в рентгеновских лучах. Но после того как его помощник умер от ожогов Х-лучами, Эдисон прекратил все опыты с ними. Однако, несмотря на очевидную опасность, работы с новыми лучами, расширяясь и углубляясь, продолжались.

Nuclear Milestones

- **<u>1895</u>** Wilhelm Roentgen of Germany, while conducting experiments with cathode rays, *accidentally* discovers of a new and different kind of ray.
  - These rays were so mysterious that Roentgen named them "*x-rays*" but he didn't receive patent for this discovery.
  - He received the first Nobel Prize in Physics in 1901 for this discovery.
  - Within five years of the discovery, the British army began using a mobile x-ray unit to locate bullets and shrapnel in wounded soldiers in the Sudan.

АНТУАН АНРИ БЕККЕРЕЛЬ



Анри Беккерель родился в Париже 15 декабря 1852 г. в семье потомственных физиков. Дом, в котором он родился, принадлежал Национальному музею естественной истории. Здесь прошла жизнь двух поколений знаменитой семьи Беккерелей и началась жизнь третьего поколения этой династии физиков.

Родоначальником этой славной династии был дед Антуан Сезар Беккерель (1788--1878 гг.) -- профессор, член Парижской академии наук. Летом 1835 года в Венеции Антуан Сезар Беккерель наблюдал сказочную по красоте фосфоресценцию Адриатического моря. С этого момента он, первый из семьи Беккерелей, заинтересовался проблемой фосфоресценции -- свечении, продолжающемся после прекращения действия падающего света

Анри Пуанкаре задался вопросом, не сопровождается ли всегда флюоресценция, какова бы ни была причина ее вызывающая, испусканием лучей Рентгена. Он высказал эту мысль на очередном заседании Парижской академии.

Троост и Нивенгловский обнаружили эффект

Беккерель обладал обширной коллекцией фосфоресцирующих веществ, собранной еще его отцом и дедом. Он решил провести эксперименты с солями урана. Схема эксперимента была аналогичной опытам Трооста и Нивенгловского. Фотопластинки заворачивались в непрозрачную для видимого света черную бумагу, поверх которой накладывалась медная фольга в форме креста. Поверх нее Беккерель помещал плоские кристаллики двойной сернокислой соли урана и выставлял эту сборку на несколько часов на солнечный свет. После проявления на фотопластинке четко обозначились темные засвеченные площади соответствующих кристалликов, а на фоне этой засветки четко проступал контур креста. 24 февраля 1886 года Беккерель на заседании Парижской Академии наук поспешил объявить, что у такого сильно фосфоресцирующего вещества, как двойной сульфат уранила калия, выставленного на свет, наблюдается невидимое излучение, подобное рентгеновскому, проходящее сквозь черную бумагу и восстанавливающее соли серебра на фотопластинке.
Идея Пуанкаре – подтверждена!!! Но Беккерель не делает окончательного заключения!

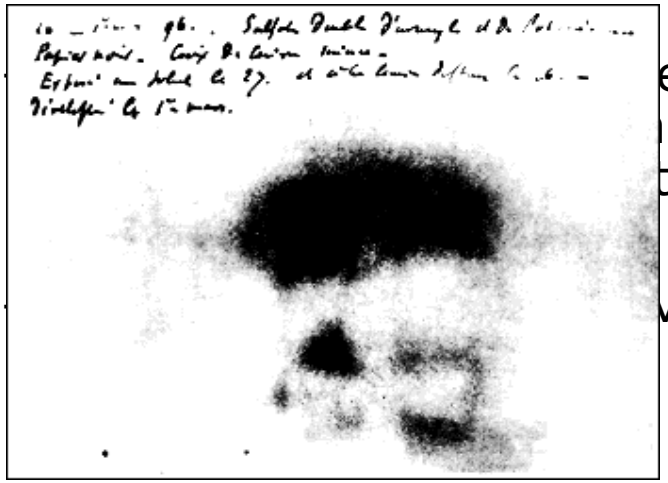
В последующие дни Беккерель усовершенствовал метод работы. Он сконструировал специальные рамки, обтянутые черным полотном, в которые могли помещаться фотопластинки. Вся подготовка к эксперименту была закончена уже к среде 26 февраля, однако как 26, так и 27 февраля стояла пасмурная погода. Наблюдения фосфоресценции без солнца были невозможны, и Беккерель спрятал приготовленные, но не подвергнутые освещению рамки с фотопластинками в ящик стола. Они пролежали там в полной темноте еще два дня. Наконец, 1 марта погода улучшилась, и можно было начать эксперименты. Простая логика подсказывала -- пластинки пролежали в темноте, и с ними ничего не могло произойти. Тем не менее, будучи тщательным во всех мелочах, Беккерель рещил до начала эксперимента проявить их, поскольку пластинки пролежали в контакте с солями урана несколько дней, а это могло нарушить идентичность проведения этих и предыдущих экспериментов. Именно эта научная щепетильность и привела его к открытию.

Беккерель проявил фотопластинки и увидел, что на них резко и четко обозначились силуэты образцов.

Практически в это же время английский физик Сильванус Томпсон проводил аналогичные эксперименты. Он заворачивал фотографическме пластинки в черную бумагу, поверх накладывал металлические листочки, а на них образцы различных минералов, в том числе куски уранового стекла и нитрат уранила. Следы обозначились на тех фотопластинках, на которых располагались образцы, содержащие уран. Томпсон пришел к выводу, что эти вещества выделяют проникающее излучение, которое засвечивает пластинки. Видимо считая, что излучение ответственное за засветку является рентгеновским, он заинтересовался вопросом несоответствия этого излучения закону Стокса. По этому закону свет, испускаемый при фосфоресценции, должен иметь большую длину волны и быть менее проникающим, чем возбуждающий. Томпсон написал об этом Стоксу, указывая на возможные недоработки открытой им закономерности. Стокс быстро откликнулся и обратил внимание С.Томпсона на важность его опытов с фотографическими пластинками. При этом он написал: "Боюсь, что вы уже опережены Беккерелем". Томпсон был опережен всего на три дня

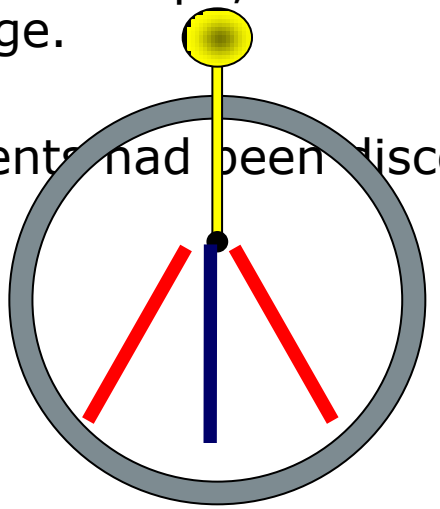
Nuclear Milestones

- **<u>1896</u>** French physicist Antoine Henri Becquerel's experiments led to the discovery of radioactivity.
  - He observed that the element uranium can blacken a photographic plate, although separated from it by glass or black paper.

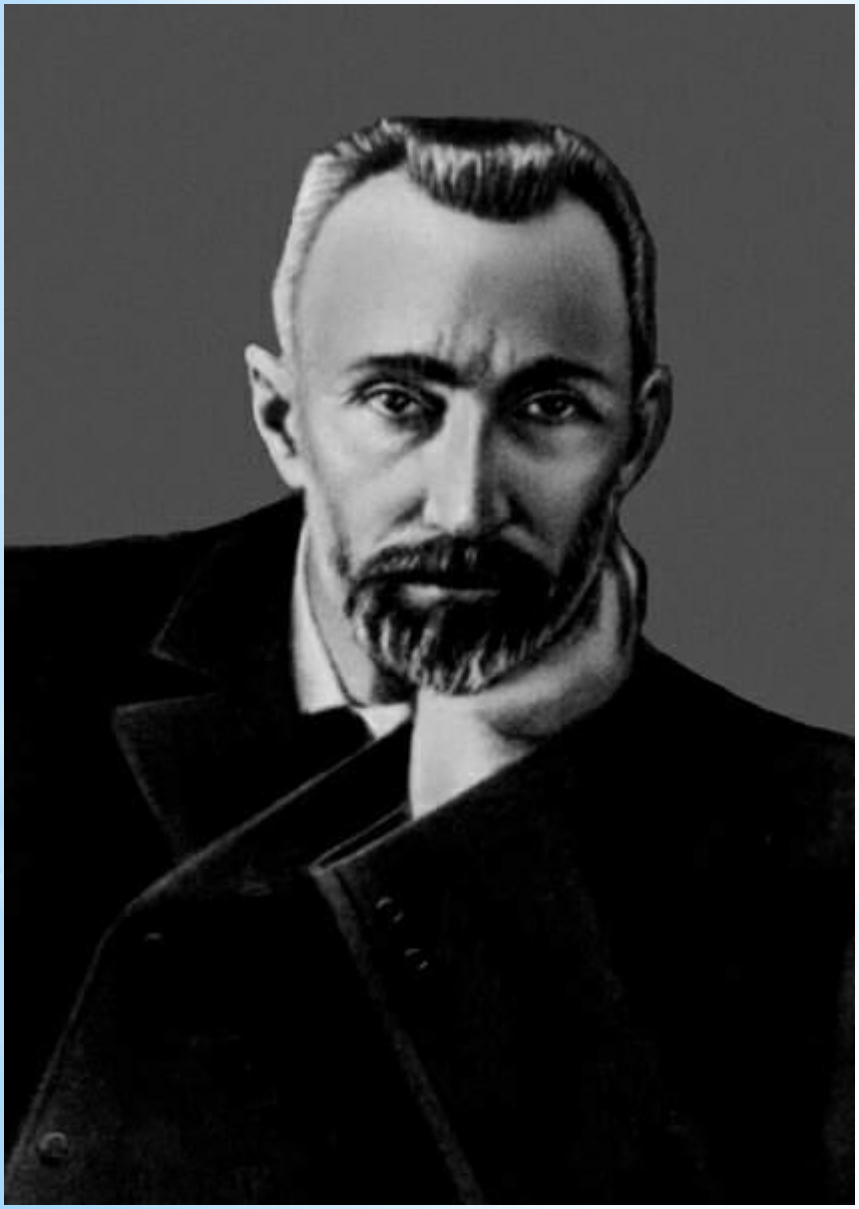


e rays that produce the darkening
g an electroscope, indicating that
tric charge.

ve elements had been discovered.



Пьер Кюри



Пьер Кюри родился 15 мая 1859 г. в Париже в семье врача Эжена Кюри. Брат Пьера Жак Кюри был старше него на три с половиной года. Их отец Эжен Кюри имел сильное влечение к естественным наукам, однако сложные материальные обстоятельства не позволили ему полностью посвятить себя науке. Тем не менее свою любовь к науке он сумел передать сыновьям. Эжен решил не сковывать детей школьной дисциплиной. Оба брата получили домашнее воспитание. С Пьером сначала занималась мать, затем отец, и только в возрасте 14 лет он был передан прекрасному педагогу А. Базилю, научившего его основам математики и латыни. Углубленного же знания математики он достиг путем самообразования. В 16 лет Пьер сдал экзамен на аттестат зрелости и получил диплом бакалавра. С 1875 г. он начал слушать лекции в Сорбонне и одновременно работать в лаборатории профессора Леру в Фармацевтическом институте в качестве помощника ассистента на кафедре физики. В 18 лет Пьер получил степень лиценциата физики. В 19 лет он был приглашен профессором Дезеном на должность ассистента на факультет естествознания Парижского университета.

В 1878 г. началась совместная работа Пьера и Жака Кюри. Ж. Кюри работал в то время в минералогической лаборатории Сорбонны ассистентом профессора Фриделя. Вскоре два юных физика (Пьеру было 21 год, Жаку -- 24) сделали важное открытие – явление пьезоэлектричества.
Было ли это открытие случайным, или существование явления пьезоэлектричества было ими предугадано?

П. Кюри постоянно руководствовался соображениями о симметрии, и к открытию пьезоэлектричества его привели размышления этого рода. Хотя работы по симметрии были опубликованы им значительно позднее 1880 г.

Для возникновения некоторого явления необходимо, чтобы в среде либо исходно существовала диссиметрия, соответствующая диссиметрии этого явления, либо такая диссиметрия возникла под действием другой причины, например, под действием механических усилий, поскольку диссиметрия среды и действия складываются.

Рассмотрим симметрию электрического поля. Пусть электрическое поле создается круглыми пластинками цинка и меди, расположенными одна напротив другой. В этой системе имеется ось симметрии и всякая плоскость, проходящая через эту ось, есть плоскость симметрии. Таким образом, симметрия электрического поля есть симметрия усеченного конуса (оно не обладает симметрией относительно отражений в плоскости перпендикулярной оси).

Рассмотрим, например, центральносимметричный кристалл. Под действием механических усилий можно понизить его симметрию только до цилиндрической симметрии, которая остается выше симметрии электрического поля. Из этого следует, что пьезоэффект эффект для такого кристалла невозможен. Именно на основании рассуждений подобного рода Кюри выбрали для исследований нецентросимметричный кристалл кварца, принадлежащий к гексагональной кристаллографической системе.} Более того, они создали на его основе замечательный прибор -- "пьезоэлектрический кварц", который впоследствии сыграл важную роль в исследованиях по радиоактивности.

Мария Кюри

Мария Склодовская родилась в Варшаве 7 ноября 1867 г. Она была младшей в семье из пяти детей. Ее мать была преподавательницей, а затем директрисой одной из лучших в Варшаве женских школ, а отец окончил Петербургский университет и преподавал математику и физику в Варшавской гимназии. В возрасте 16-и лет, Мария Склодовская с золотой медалью окончила гимназию, однако существовавший в то время запрет на прием женщин в Варшавский университет и сложное материальное положение семьи (к тому времени умерла ее мать) не позволили ей продолжить обучение. Мария и ее сестра Броня разработали план: Мария в течении 5-и лет будет работать гувернанткой, чтобы дать возможность сестре окончить медицинский институт в Париже, а затем Броня возьмет на себя расходы на высшее образование Марии. И Мария начала работать воспитательницей, сначала в семье варшавского адвоката, затем в семье управляющего в имении Щуки в 100 км от Варшавы. В ноябре 1889 г. Мария возвращается в Варшаву и начинает преподавать на подпольных курсах для польских рабочих. Одновременно она получает возможность работать в маленькой лаборатории в "Музее промышленности и земледелия", которым руководит ее двоюродный брат Иосиф Богуский, бывший ассистент Д.И. Менделеева. Здесь она научилась основам химического анализа, которые в полной мере пригодились ей при открытии полония и радия.

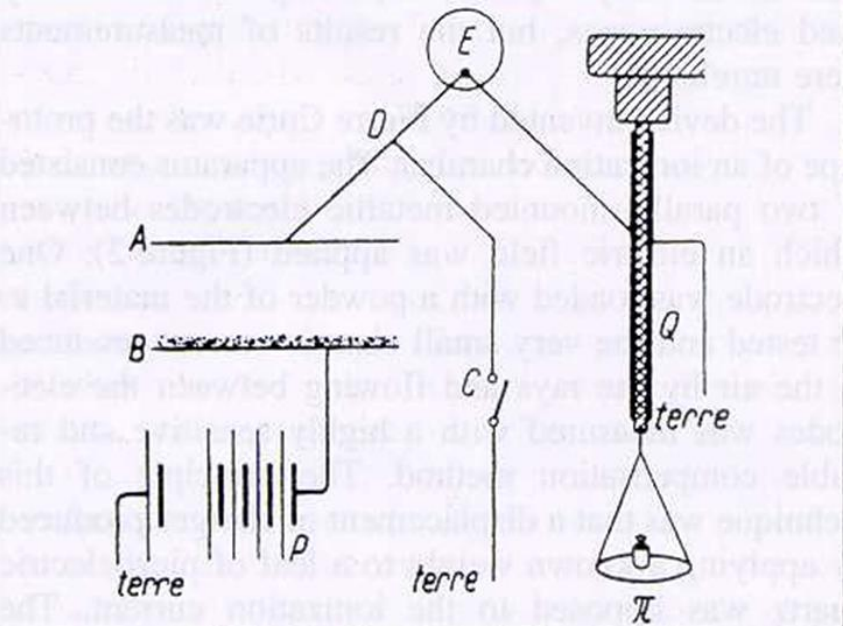
В ноябре 1891 г. в возрасте 24-х лет Мария Склодовская едет в Париж и поступает на физико-математический факультет Сорбонны. В 1893 г. она получает степень лиценциата физических наук, заняв первое место, а 1894 году степень лиценциата математических наук, заняв второе место. Одновременно Мария выполняла свою первую научную работу под руководством профессора Липпмана на тему "Магнитные свойства закаленной стали". Именно тогда, она познакомилась с Пьером Кюри, а вскоре они поженились. При выборе темы для докторской диссертации в декабре 1897 г. Мария Кюри по совету Пьера остановилась на проблеме излучения, открытого в 1896 г. А. Беккерелем.

Для того, чтобы представить точные результаты Кюри применяеют количественный метод измерения ионизации воздуха, производимой излучением урана в ионизационной камере. В дальнейшем этот же метод использовался супругами Кюри для сравнения активности различных радиоактивных веществ.

Ионизационная камера предсталяла собой плоский конденсатор, который состоял из двух пластинок А и В. Радиоактивное вещество в виде порошка размещалось на горизонтальной пластине В; благодаря своей ионизующей способности оно делало воздух между пластинками проводящим.

Кюри для измерения проводимости, вызываемой излучением образцов, создавала постоянную разность потенциалов между пластинами конденсатора А и В. В цепи возникал ток, величина насыщения которого была пропорциональна ионизующей способности порошка. Потенциал пластинки А можно было измерить с помощью электрометра Е. Для этого необходимо разомкнуть цепь и накапливать заряд на электрометре. Скорость нарастания заряда на обкладке А была пропорциональна силе тока. Для измерения величины заряда Кюри использовали компенсационный метод, в котором электрометр являлся индикатором нуля заряда. Компенсирующий заряд создавался пьезоэлектрическим кварцем Q, а нагрузка на кварц могла плавно регулироваться, например, с помощью устройства для подлива ртути. Таким образом, можно измерить абсолютное количество электричества, которое проходит через конденсатор за данное время, т. е. определить силу тока.

Чувствительность такого прибора была около 10^{-13}А.



Именно в ходе этих количественных исследований различных минералов урана и тория Кюри обнаружилм удивительный факт. "Активность этих минералов, не была пропорциональной количеству содержащегося в них урана или тория. Некоторые из этих минералов проявляли активность в три или четыре раза большую, чем надлежало по расчету для урана.

Последнее могло означать только одно -- эти минералы содержат в небольшом количестве неизвестный элемент (или элементы) гораздо более радиоактивный, чем уран или торий.

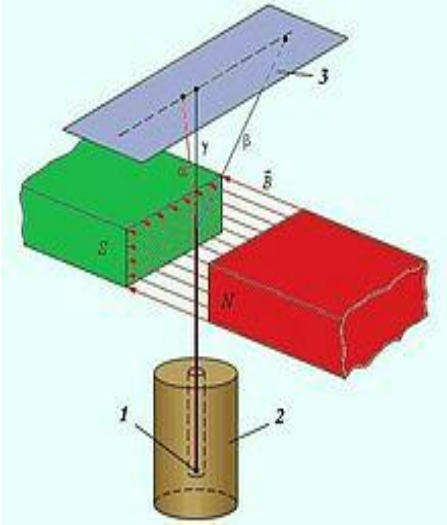
Супруги Кюри предприняли ряд химических изысканий целью которых стало выделение этого радиоактивного вещества из исходного минерала, содержащего уран и торий

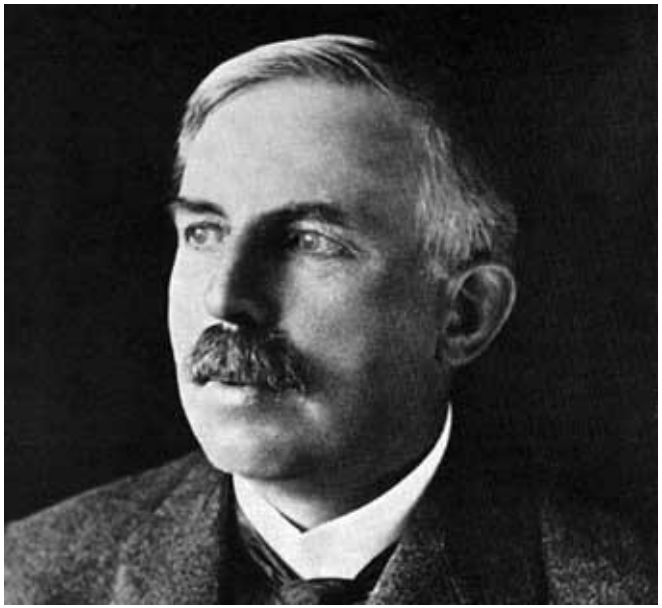
- Discovery of Radioactivity
  - A. Becquerel, Maria Curie, Pierre Curie(1896 – 1898):
    - also other heavy elements (thorium, radium) show radioactivity
    - three kinds of radiation, with different penetrating power (i.e. amount of material necessary to attenuate beam):
      - "Alpha (α) rays" (least penetrating – stopped by paper)
      - "Beta (β) rays" (need 2mm lead to absorb)
      - "Gamma (γ) rays" (need several cm of lead to be attenuated)
    - three kinds of rays have different electrical charge:

$$\alpha: +, \ \beta: -, \ \gamma: 0$$

Ernest Rutherford
(Born in New Zealand 1871-1937)

- **University of Manchester, England**





Identification of radiation:

Ernest Rutherford (1899)

Beta (β) rays have same q/m ratio as electrons

Alpha (α) rays have same q/m ratio as He

Alpha (α) rays captured in container show He-like emission spectrum

Geiger, Marsden, Rutherford expt.

(Geiger, Marsden, 1906 - 1911) (interpreted by Rutherford, 1911)

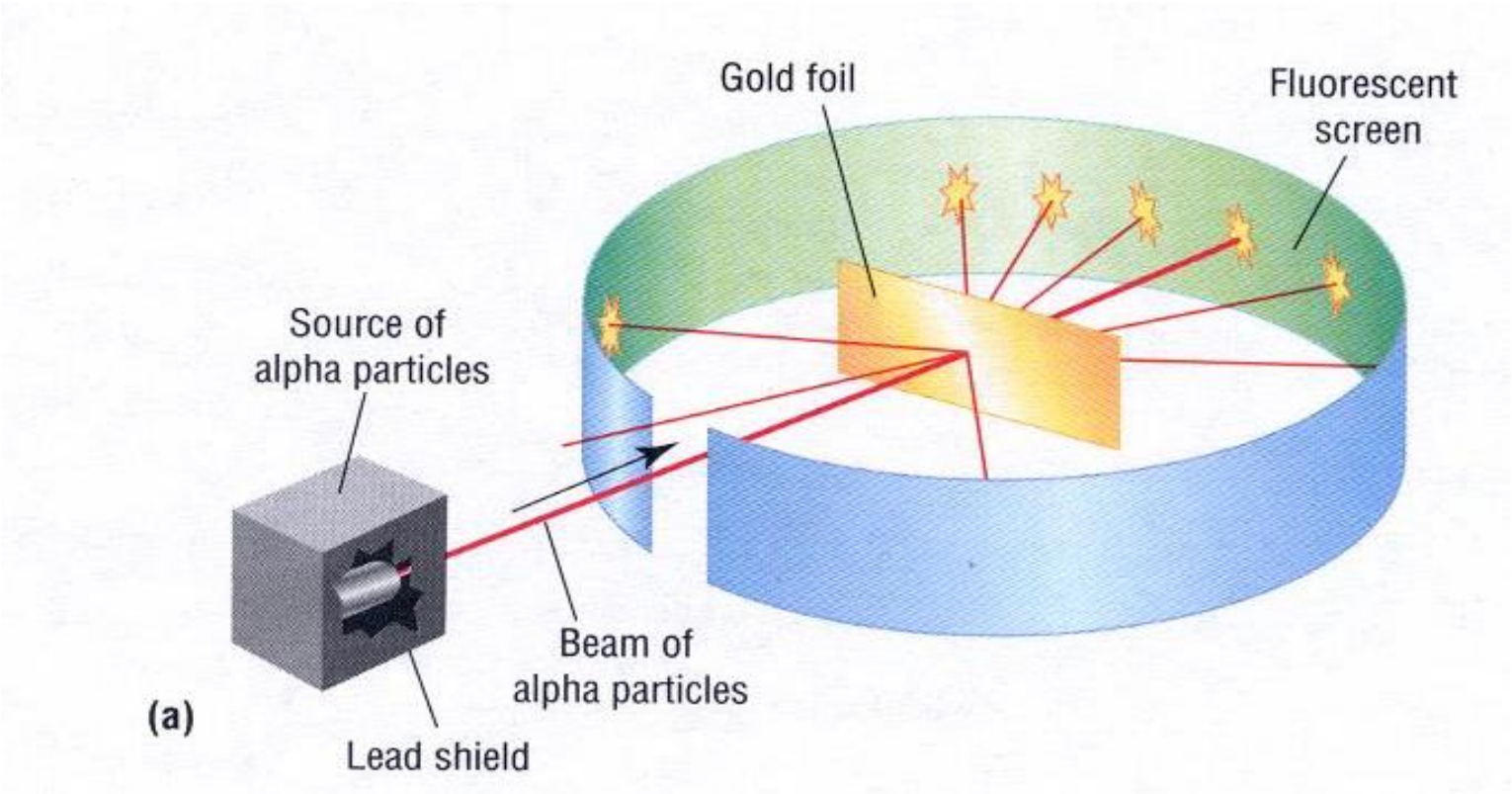
get α particles from radioactive source

make "beam" of particles using "collimators"

(lead plates with holes in them, holes aligned in straight line)

bombard foils of gold, silver, copper with beam

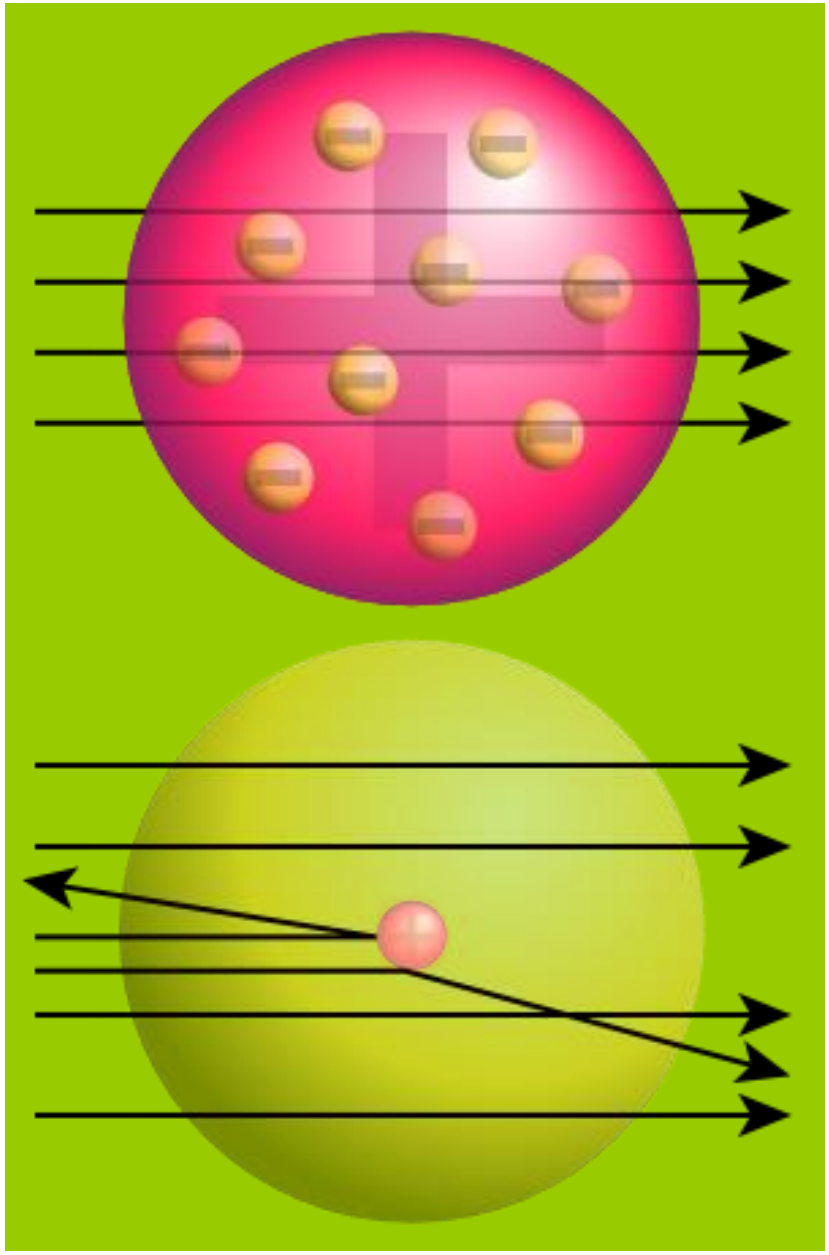
measure scattering angles of particles with scintillating screen (ZnS)



Rutherford

- Expected

(Tomson model)

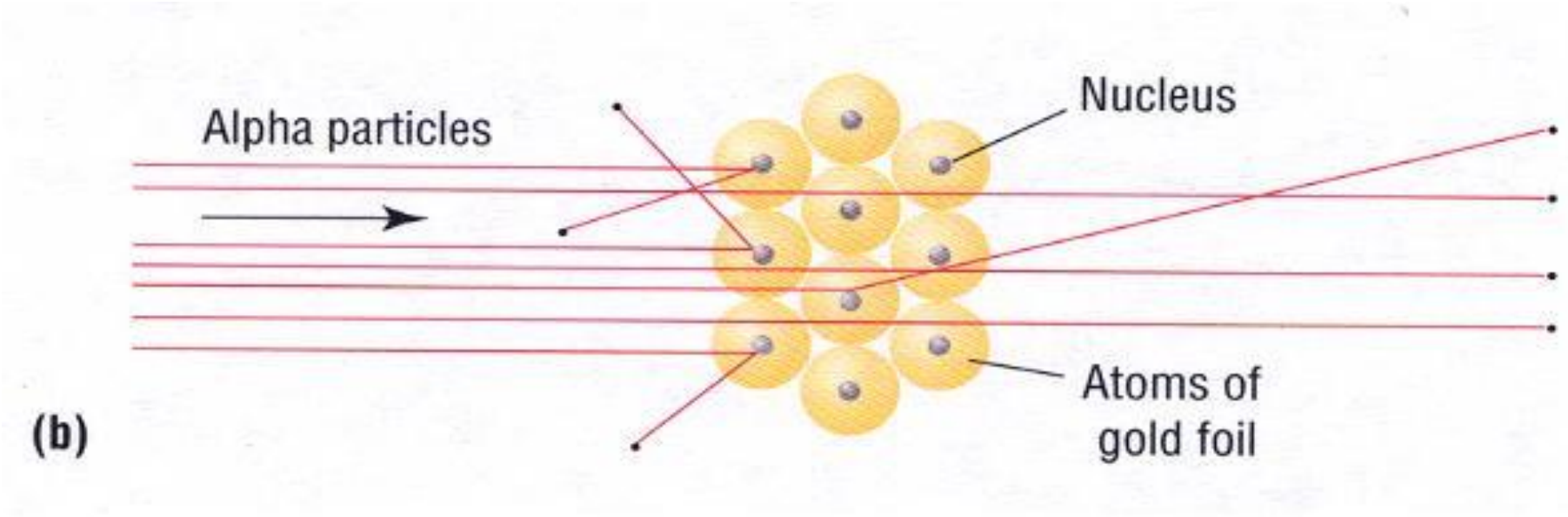


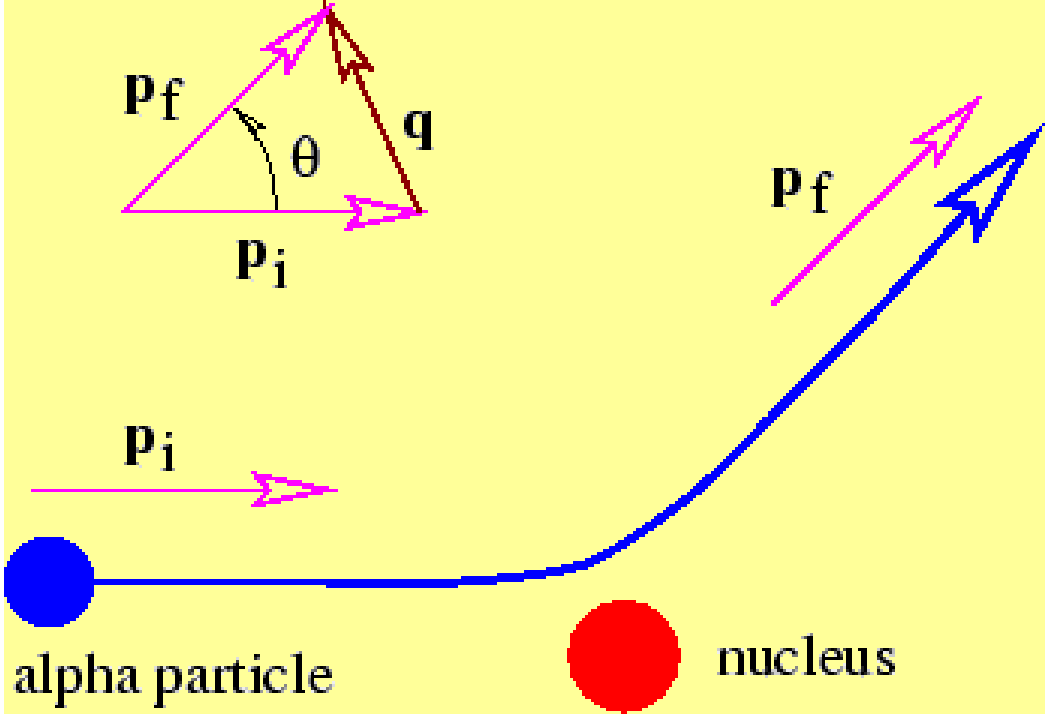
- Found

Rutherford’s Conclusions

- All of the positive charge, and most of the mass of an atom are concentrated in a small core, called the **nucleus**.

Rutherford's Experiment





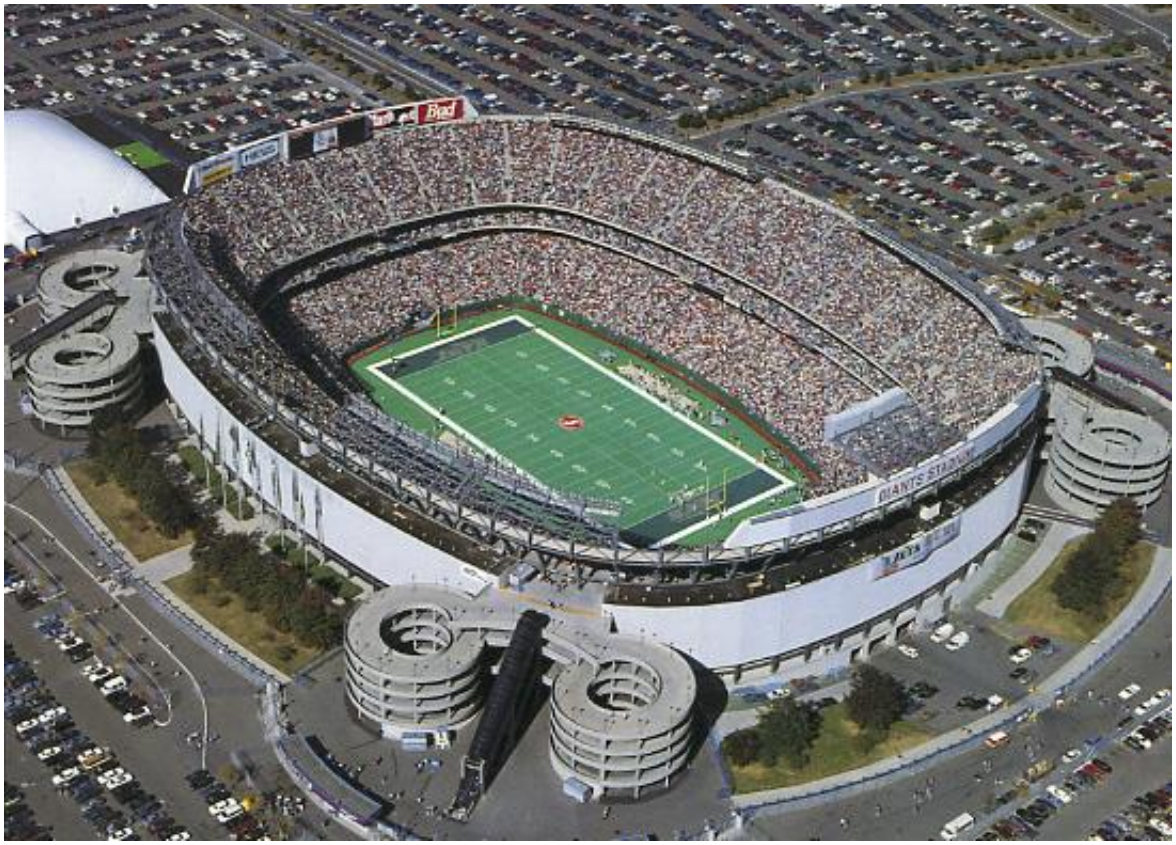
$$\frac{dN}{N} = cl\left(\frac{kze}{mv^2}\right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4\frac{\theta}{2}}$$

m **– масса, а *υ* - скорость α -частицы;**

$k = 1/4\pi\varepsilon_0$ **- постоянная в законе Кулона, *Ze* – заряд ядра**

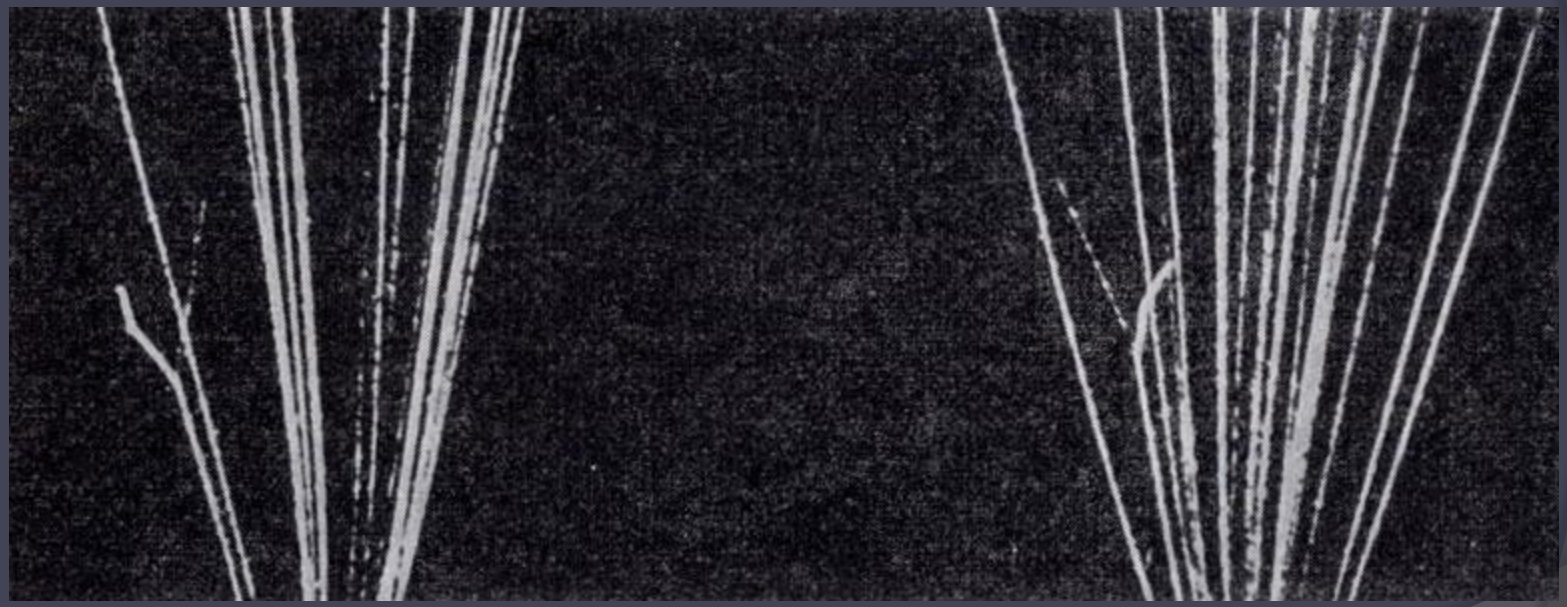
c **– концентрация ядер в фольге, *l* – толщина фольги.**

Size of Nucleus compared to the size of the atom is like a small ball compared to a football field.

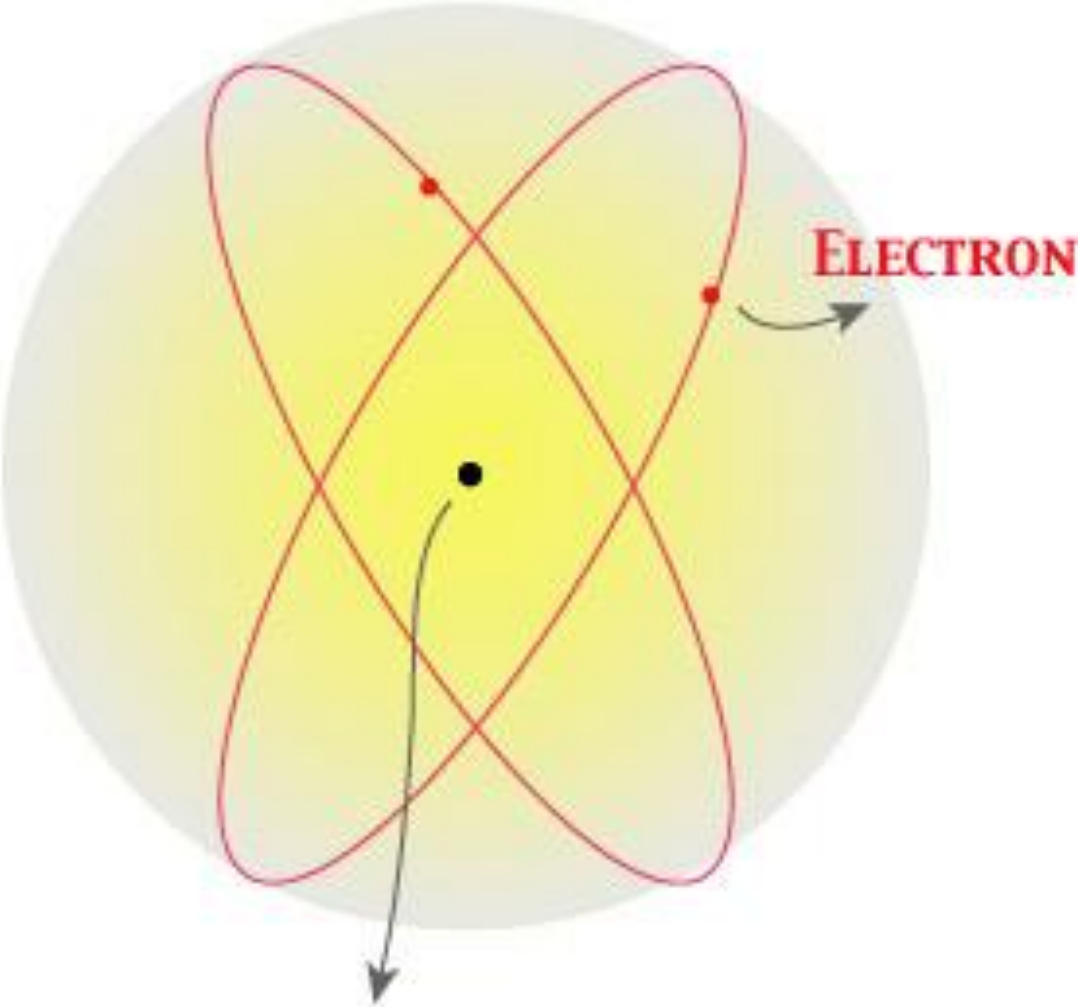


Удостовериться в том, что из ядра атома вылетал протон, удалось в *камере Вильсона*. Через прозрачное круглое окошко камеры Вильсона даже невооружённым глазом можно увидеть траектории частиц, быстро движущихся в ней. На рисунке видны расходящиеся веером прямые линии - следы α-частиц, не ударившихся об ядро атома азота. Но след одной α-частицы раздваивался, образуя «вилку». Это значит, что в точке раздвоения траектории произошло взаимодействие α-частиц с ядром атома азота, в результате чего образовались ядра атомов кислорода и водорода.

При дальнейшем исследовании взаимодействия α -частиц с ядрами других элементов, было выяснено, что из всех этих ядер α -частицы выбивали протоны. Значит, протоны входят в состав ядер атомов всех химических элементов.



Rutherford's Model of Atom



Nucleus, about the size of 1/5000 of the whole atom

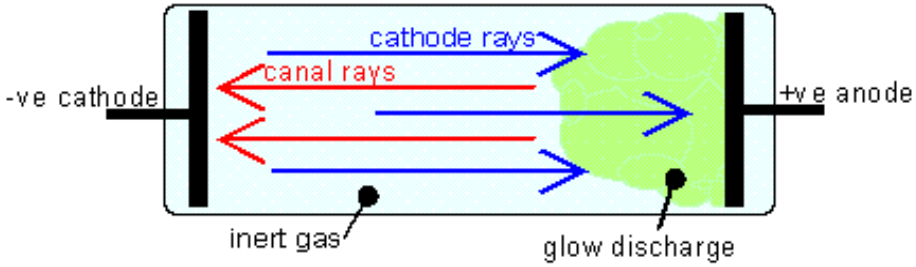
Nuclear Milestones

- **<u>1905</u>** Albert Einstein publishes the special theory of relativity regarding convertibility of matter and energy ($E=mc^2$).

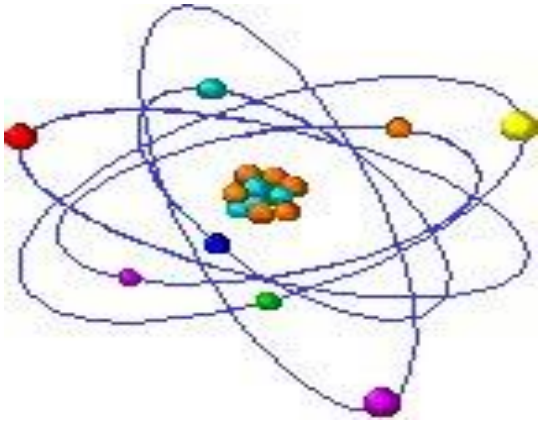
- **<u>1913</u>** Niels *Bohr* publishes theory of atomic structure combining nuclear theory with quantum theory.

Proton

- "Canal rays"
  - 1898: Wilhelm Wien: opposite of "cathode rays"



- Positive charge in nucleus (1900 – 1920)
  - Atoms are neutral
    - positive charge needed to cancel electron's negative charge
    - Rutherford atom: positive charge in nucleus
  - periodic table ⇒ realized that the positive charge of any nucleus could be accounted for by an integer number of hydrogen nuclei -- protons



Nuclear Timeline

(www.atomicarchive.com)

- **1931** November - Harold Urey discovers *deuterium*, an isotope of hydrogen that contains one proton and one neutron.

- **1932** February - James Chadwick discovers the *neutron*.

- **1933** April - Max Born, James Franck and many other scientists are compelled to leave their posts at German universities because of their "Jewish physics".

Sir James Chadwick

By Lauren Haddad

Sir James Chadwick discovered the

What did Chadwick do?

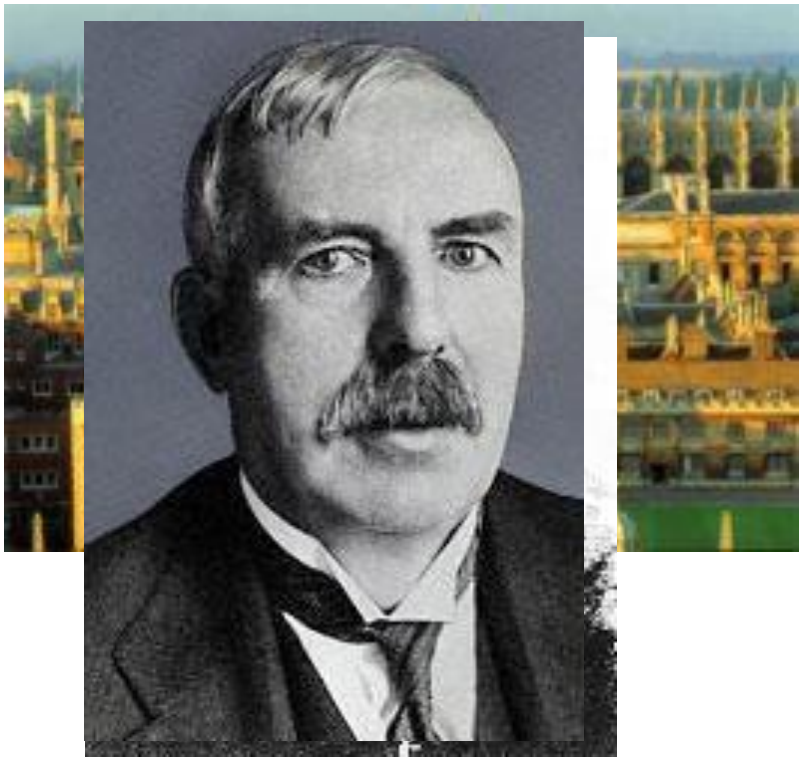
Neutron in 1932.

Sir James Chadwick

James Chadwick was Born on Oct 24th, 1891 in Manchester.

And he died on July 24th, 1974 in Cambridge.

Sir James Chadwick was educated at Manchester and Cambridge Universities.



He also studied under Hans Geiger (created the Geiger counter) in Berlin, Germany.

Then from 1923 he worked with Ernest Rutherford in the Cavenish Laboratory in Cambridge.

Idea's Before Chadwick

•Twelve Years earlier Ernest Rutherford, a pioneer in atomic structure, had postulated the existence of a neutral particle, with the approximate mass of a proton.

Atomic mass M (~ Z) of isotopes grows faster than atomic number A

not only protons in nucleus !!!

Представление Резерфорда

Резерфорд представлял нейтрон в виде «дублета» из протона и электрона, а не в виде самостоятельной нейтральной частицы

открытая еще в 1898 г. β-радиоактивность ядер, как казалось, вполне определенно указывала на наличие электронов внутри атомных ядер β-излучение ядер — поток электронов).

Чадвик был под большим впечатлением от этой идеи и принял активное участие в поисках ее подтверждения, но безрезультатно

Разряд в водороде

Однако в дальнейшем сам Резерфорд больше не высказывался публично на эту тему

1924 г., французский физик Луи де Бройль предложил сопоставлять с электроном некую *волну*. Длина этой волны λ выражалась через импульс электрона p следующим образом:

$$\lambda = h/p, \qquad (1)$$

где $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — универ-

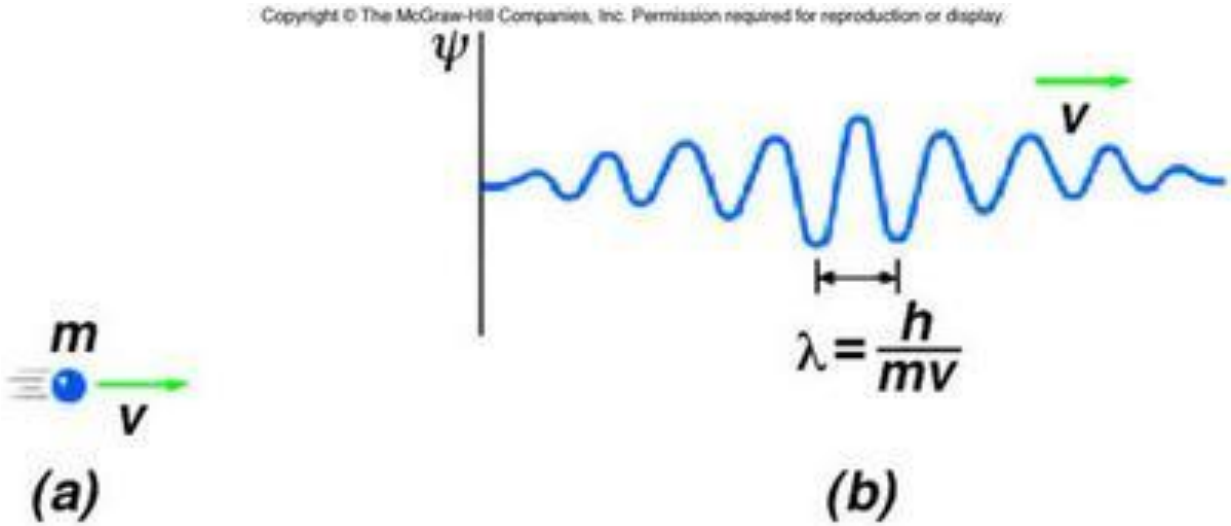
С чем это могло быть связано?

потеза де Бройля (и в частности, формула (1)) получила экспериментальное подтверждение в опытах, обнаруживших дифракцию электронов при прохождении сквозь тонкие металлические пластинки.

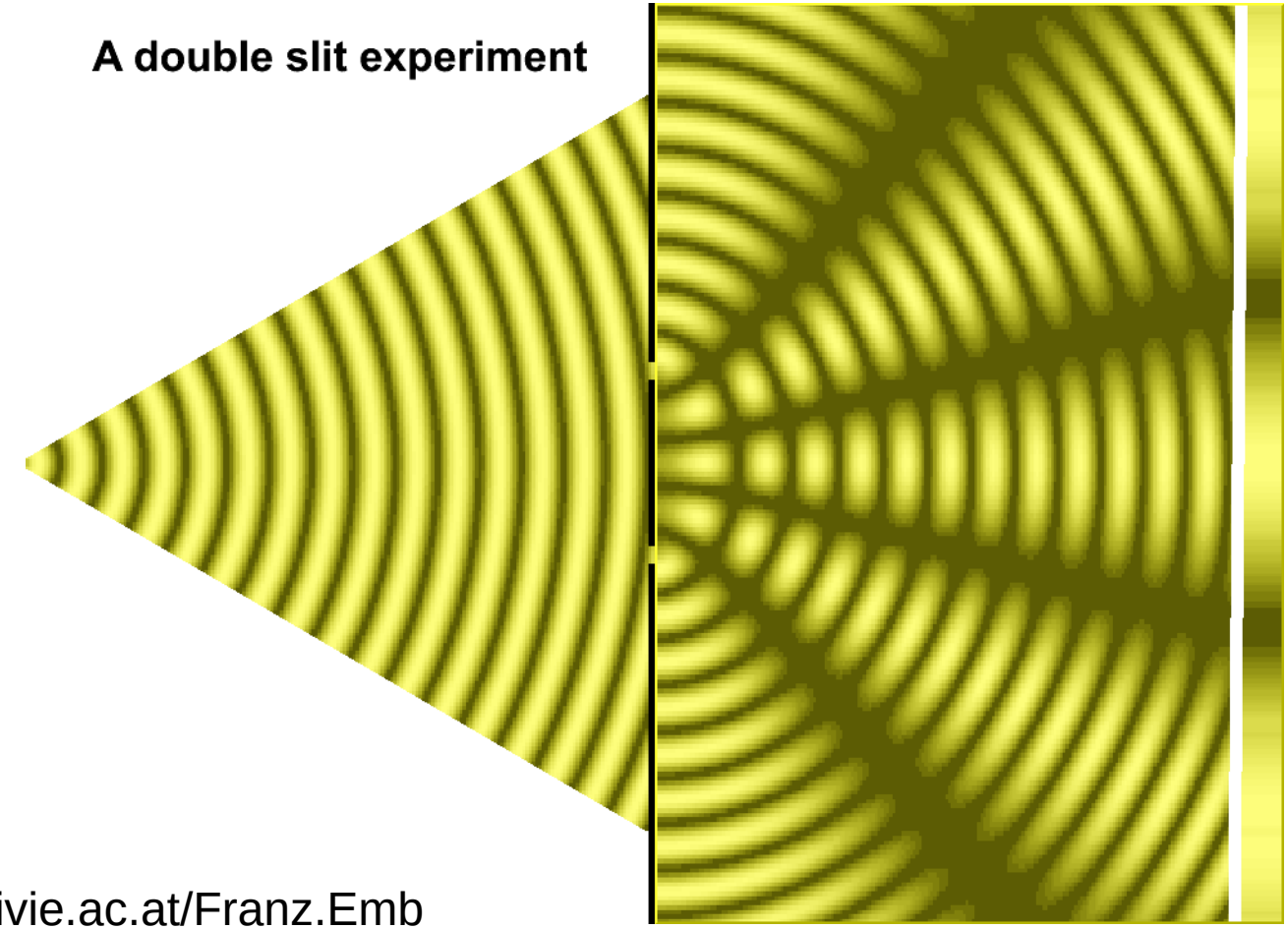
De Broglie Waves

Louis de Broglie(1892-1987)

In 1924, the French physicist Louis de Broglie proposed that moving objects behave like waves; these are called **matter waves**. The **de Broglie wavelength** of a particle of mass *m* and speed *v* is $\lambda = {}^{h}/_{mv}$.



Double Slit



http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/KinderUni2005/waves.gif

чтобы поместиться в ядре, электрон должен иметь длину волны λ, не превышающую диаметра d ядра: $\lambda < d$. Используя (1), получаем отсюда неравенство

$$p > h/d. \qquad (2)$$

$$E = pc \quad \rightarrow \quad E > hc/d.$$

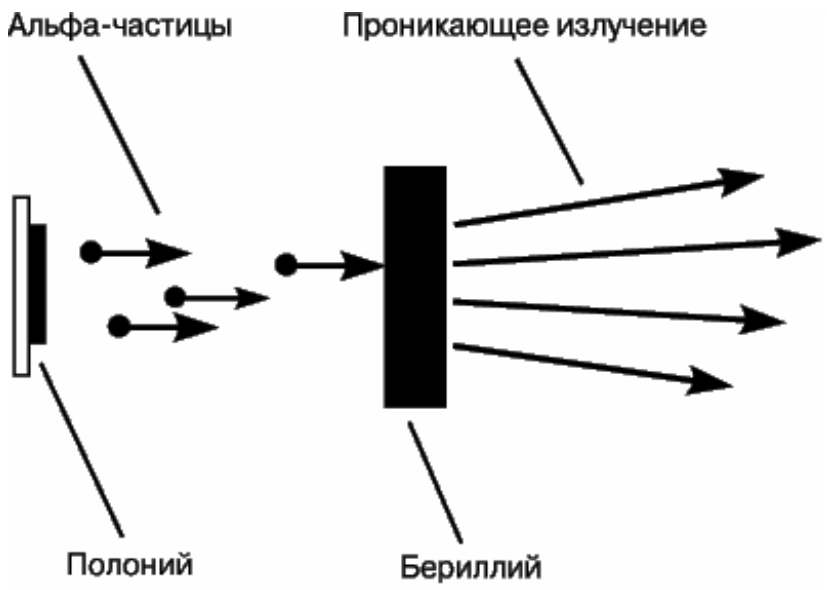
Подставив сюда значения h, c и d, получим: $E > 2 \cdot 10^{-11}$ Дж, или $E > 10^8$ эВ

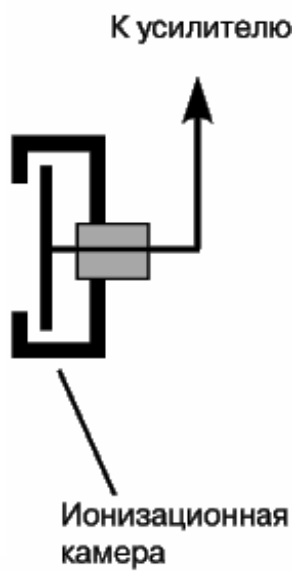
Итак, чтобы поместиться внутри атомного ядра, электрон должен иметь энергию не менее 10^8 эВ. При β-распаде ядра эта энергия должна была бы освобождаться. Однако, как показывает опыт, энергия, выделяющаяся при β-распаде ядер, существенно меньше — она не превосходит 10^5—10^6 эВ (в расчете на одно ядро).

•1928, a German physicist, Walter Bothe, and his student, Herbert Becker,

Walter Bothe

Существенной вехой на пути открытия нейтрона стали опыты Боте и Беккера в Германии,\ обнаруживших жесткое излучение из бора и бериллия, возникающее под действием альфа-излучения. В своих экспериментах они использовали счетчик Гейгера-Мюллера, имевший наибольшую чувствительность к γ-квантам.





$$_4Be^9 + {}_2He^4 \rightarrow ({}_6C^{13}) \rightarrow {}_6C^{13} + \gamma$$

5 Mev

Было высказано предположение, что это излучение представляет собой жесткие гамма-лучи, которые возникают за счет того, что при присоединении альфа-частицы к ядру бериллия возникает сильно возбужденный изотоп углерода, который при переходе в основное состояние испускает гамма-квант большой энергии.

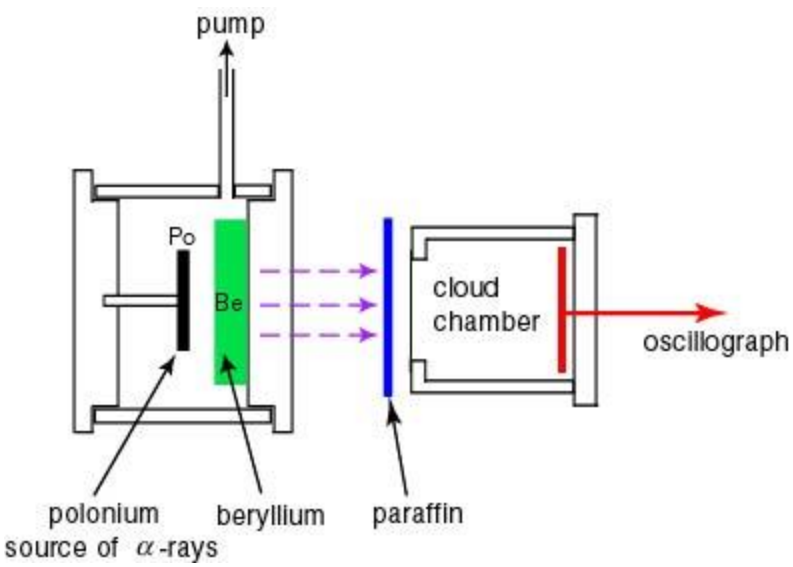
Когда между препаратом и счетчиком помещался слой свинца толщиной в 1 см, то наблюдалось ослабление интенсивности излучения примерно на 20% для бериллия и 44% для бора. Доказательством того, что это излучение принадлежит облученным атомам бериллия, а не самому полониевому источнику служило то, что излучение полониевого источника ослаблялось этим же слоем свинца на 52 %. Пересчет из поглощения в свинце показывал, что энергия этого жесткого бериллиевого гамма-кванта должна быть около 5 Мэв.

Счетчик Гейгера, применявшийся в этих исследованиях в качестве детектора, не был чувствителен к нейтронам, вследствие чего авторы не могли наблюдать их в своих экспериментах. Возможность наблюдения нейтронов в последующих опытах появилась только после внедрения в экспериментальную практику в качестве детекторов камер Вильсона. Правильность измерений энергий гамма-квантов (5 Мэв для бериллия и 3 Мэв для бора), сделанных Боте и Беккером, впоследствии была подтверждена.

Таким образом, открытие Боте и Беккером искусственной гамма-активности ядер, о котором они сообщили в 1930 г., прошло, к сожалению, практически незамеченным на фоне общего оживления, связанного с открытием нейтрона. Однако проведение более точных измерений было затруднено малой интенсивностью.

Then...

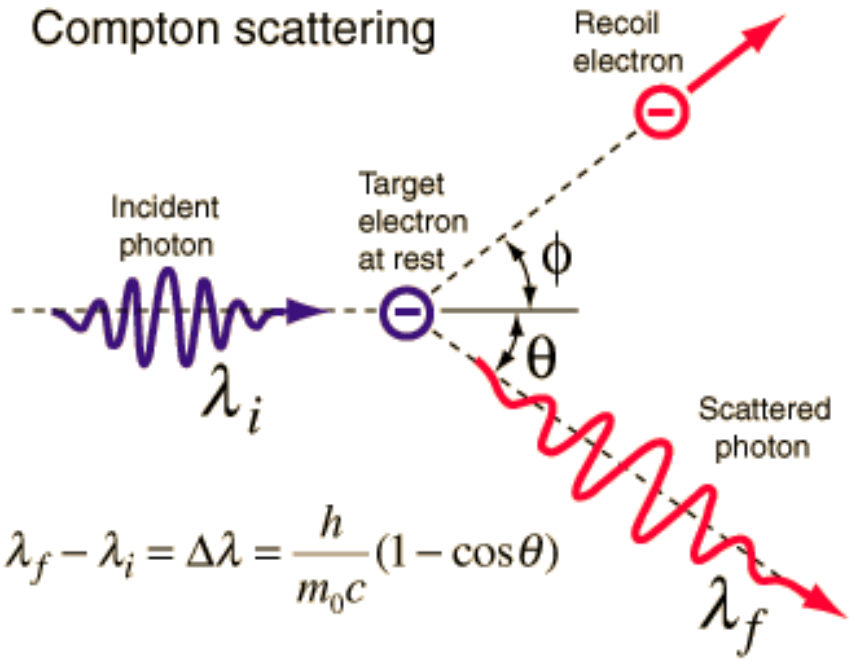
•In 1932, Irene Joliot-Curie, one of Madame Curie's daughters, and her husband, Frederic Joliot-Curie, decided to use their strong polonium alpha source to further investigate Bothe's penetrating radiation. They found that this radiation ejected protons from a paraffin target.



Они располагали значительно более мощным источником (100 милликюри вместо 3 - 7 милликюри у источника Боте и Беккера). Кроме того используемая ими методика позволяла измерять поглощение в свинце. Они обнаружили, что ионизирующее действие обсуждаемых бериллиевых лучей значительно возрастает при их прохождении через пластинку парафина.

They used the analogy of the **Compton Effect**

Compton effect



$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta)$$

Elastic scattering of massless photon with electron (initially at rest)

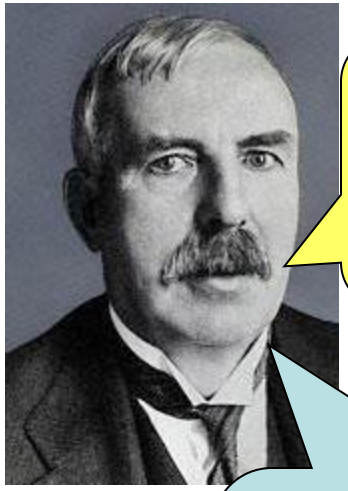
For γ and M_p: E = 50 Mev instead of 5 Mev !!!

•However, the Joliot-Curies interpreted the results as the action of photons on the hydrogen atoms in paraffin.

Измерение максимальных расстояний, проходимых в воздухе протонами, возникающими под действием гамма-лучей бериллия и бора, равны, соответственно, 26 и 8 см. Это соответствует энергии протонов порядка 4.5 Мэв и 2 Мэв. Наименее быстрые протоны испускаются наименее проникающим излучением, а именно излучением бора. Это означало, что энергии бериллиевых гамма-квантов уже надо приписать энергию отнюдь не 5 Мэв, как следовало из опытов Боте и Беккера, а около 50 Мэв! Таким образом, на лицо было противоречие этих двух экспериментов. Тем не менее, Ирен Кюри и Жолио продолжали трактовать свои результаты как аналог эффекта Комптона, то есть как процесс выбивания гамма-квантами протонов из парафина.

Then...

When James Chadwick reported to Lord Rutherford on the Joliot-Curies' results, Lord Rutherford exclaimed...



I Don't Believe it!!

The Compton effect, I never would have thought!!

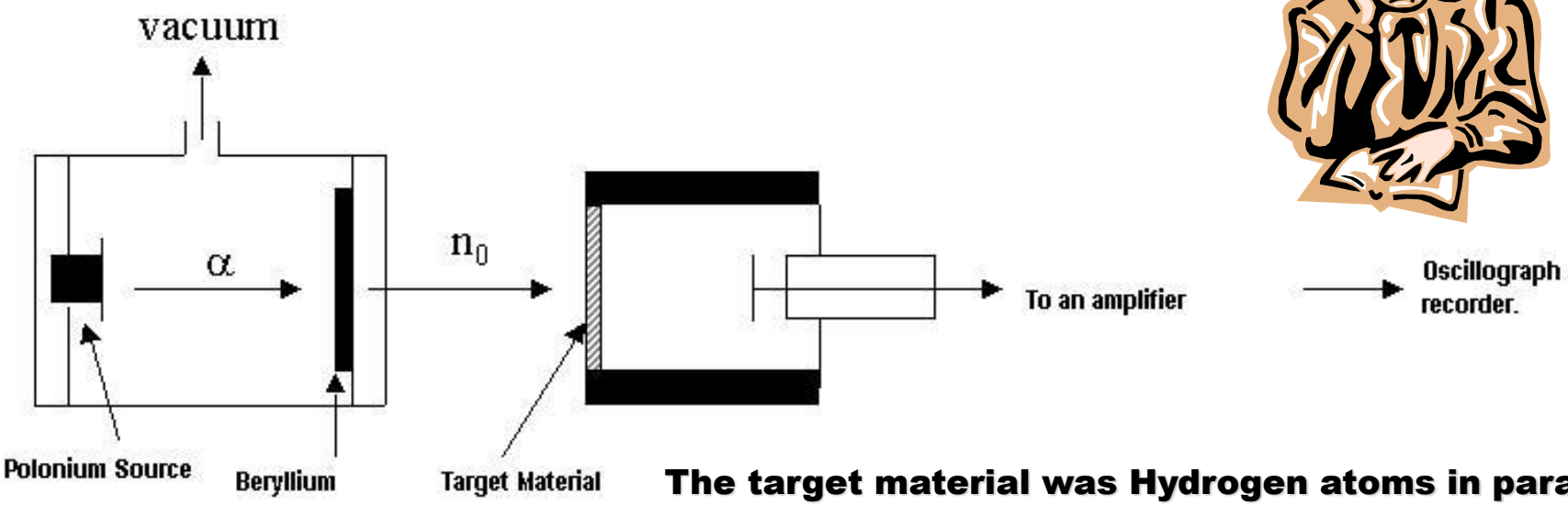
Chadwick immediately repeated the experiments that Joliot-Curie had previously carried out at the Cavendish Laboratory in Cambridge, England.

$_4Be^9 + {}_2He^4 \rightarrow {}_6C^{13}$

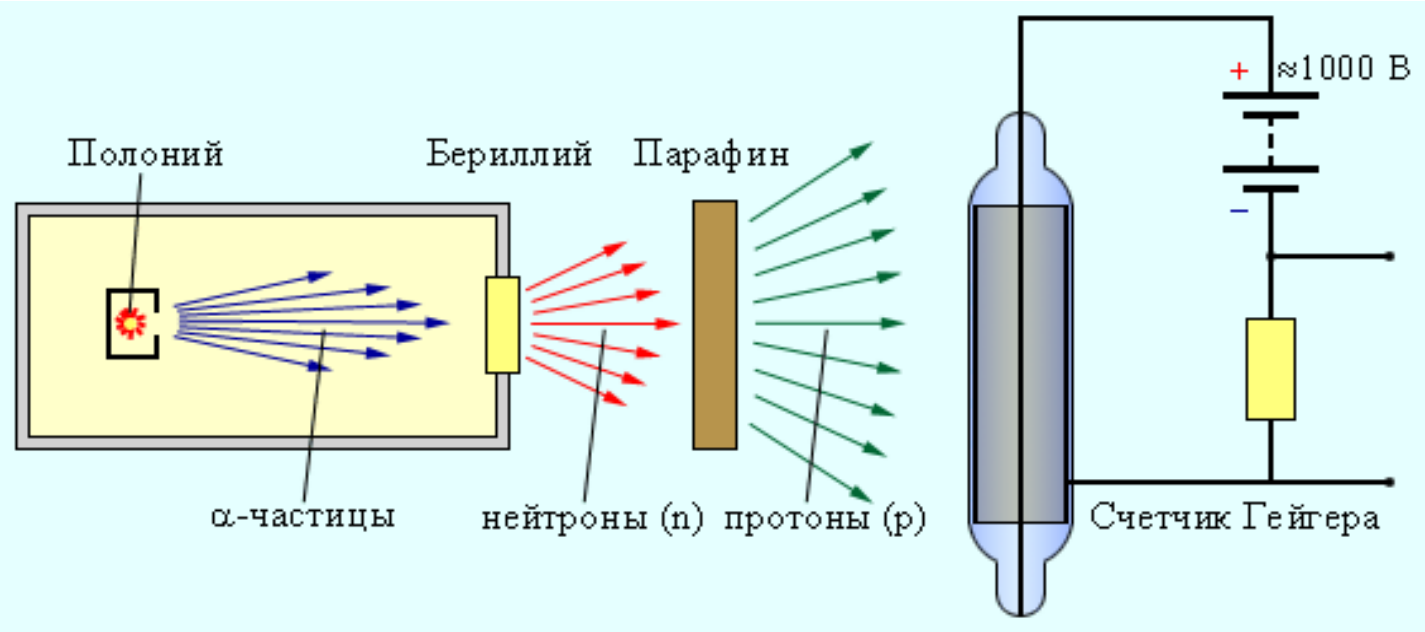
Defect mass → only 15 Mev !!!

Chadwick's Diagram and apparatus

This is how he set up his experiment.



He not only bombarded a target of HYDROGEN, but he also used HELIUM, NITROGEN and other elements as targets.


Полоний
Бериллий
Парафин
+
≈1000 В
–
α-частицы
нейтроны (n)
протоны (p)
Счетчик Гейгера

$$mv^2/2 = mv_1^2/2 + m'v_2^2/2,$$

$$m\vec{v} = m\vec{v}_1 + m'\vec{v}_2,$$

$$v_2 = 2vm/(m + m')$$

$$v_2'/v_2'' = (m + m'')/(m + m').$$

$m' = 1$ и $m'' = 14$. Измерив для этих мишеней энергии ядер отдачи, Чедвик нашел, что $v_2'/v_2'' \approx 7$. В этом случае соотношение (6) приобретает вид

$$(m + 14)/(m + 1) \approx 7,$$

откуда немедленно следует, что $m \approx 1$.

In his own words

- The properties of the penetrating radiation emitted from beryllium (and boron) when bombarded by the a-particles of polonium, have been examined. It is concluded that the radiation consists, not of quanta as hitherto supposed, but of neutrons, particles of mass 1, and charge 0. Evidence is given to show that the mass of the neutron is probably between 1·005 and 1·008.

Открытие нейтрона

Первая развилка

- Деление ядер
- Структура ядер
- Нейтронные звезды

Сразу же после открытия нейтрона советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предложили новую модель ядра. Согласно этой модели ядро состоит из протонов и нейтронов, между которыми на весьма малых р[illegible]уют мощные силы пр[illegible]тромагнитного характера — ядерные силы. Протонно-нейтронная модель была свободна от всех неувязок и «натяжек» прежних моделей ядра, объясняла известные к тому времени данные о ядерных превращениях. Дальнейшие исследования подтвердили несомненную справедливость этой модели и сделали ее общепринятой и бесспорной.

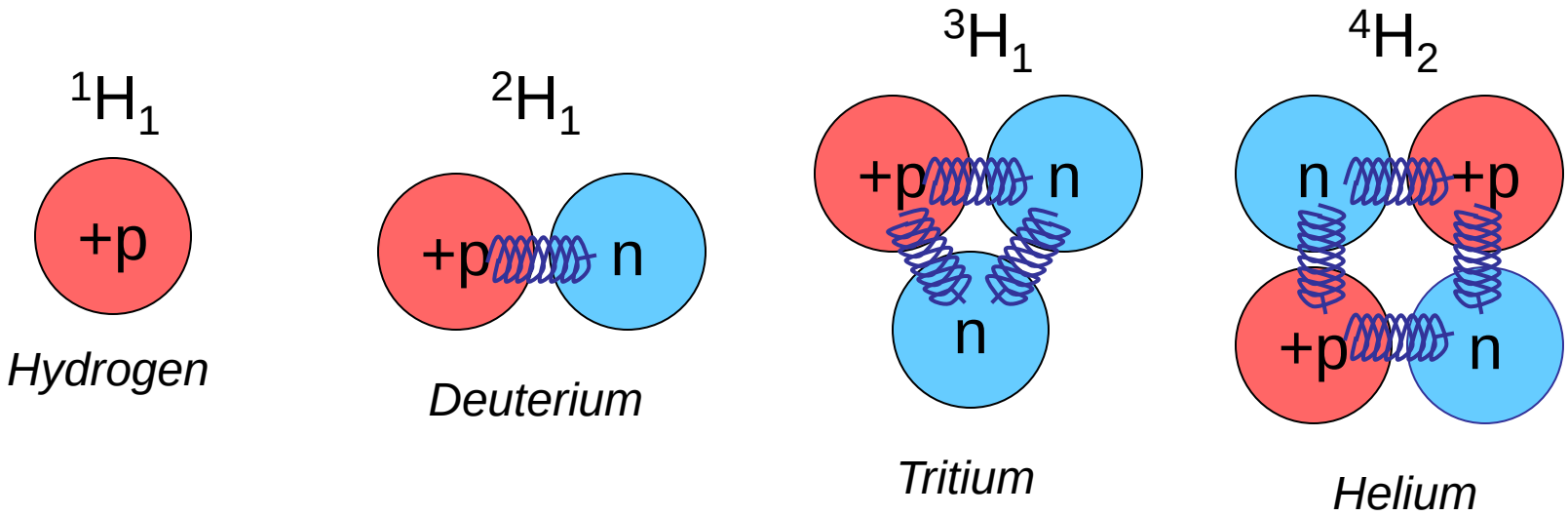
Выводы

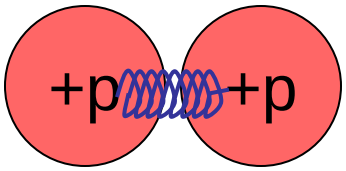
Д.Д. Иваненко (рукопись получена) 21.04.1932)

В. Гейзенберг (в этой работе он уже ссылается на Иваненко) (07.07.1932)

Nuclear Binding Force

•If the nucleus is made of protons, why do the positive charges stick together?





Does not bind!

= nuclear binding force

gluon

force carrier

Nuclear energy levels: example

Estimate the lowest possible energy of a neutron contained in a typical nucleus of radius 1.33×10^{-15} *m*.

$E = p^2/2m = (cp)^2/2mc^2$

$\Delta x\, \Delta p = h/2\pi$ ➔ $\Delta x\, \Delta(cp) = hc/2\pi$

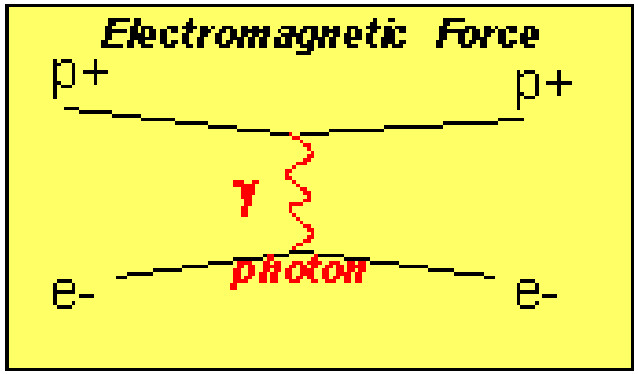
$\Delta(cp) = hc/(2\pi\, \Delta x) = hc/(2\pi\, r)$

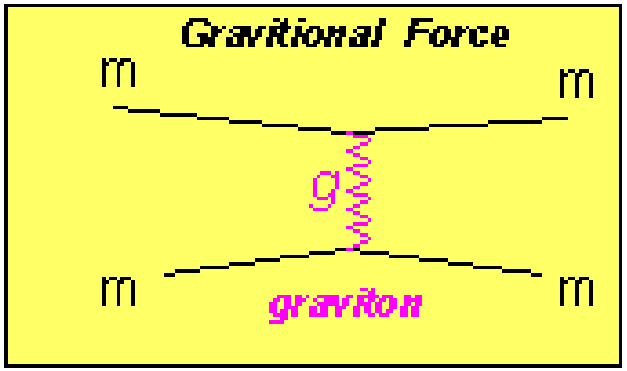
$\Delta(cp) = 6.63\text{x}10^{-34}$ Js * $3\text{x}10^{8}$ m/s / (2π * $1.33\text{x}10^{-15}$ m)

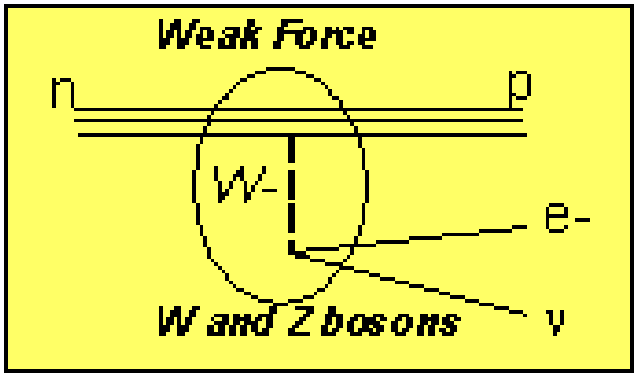
$\Delta(cp) = 2.38\text{x}10^{-11}$ J = 148.6 MeV

$E = p^2/2m = (cp)^2/2mc^2 = (148.6\text{ MeV})^2/(2*940\text{ MeV}) = 11.7\text{ MeV}$

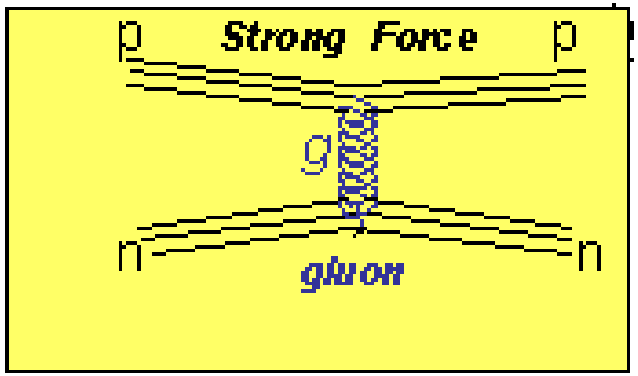
Particle Interactions







1930 г



Ядерное (сильное) взаимодействие – первое фундаментальное взаимодействие открытие которого обязано нейтрону

Four Fundamental Forces

Force	Particles	Strength	Range	Mediator
Gravity	All	6E-39	Infinite	Graviton
Weak	All	1E-5	1E-17 m	$W^{\pm}$, Z^0
Electro-magnetic	Charged Particles	1/137	Infinite	Photon
Strong	Hadrons (protons and neutrons)	1	1E-15 m	Gluon

Neutron star discovery

-The existence of neutron stars was predicted by Landau (1932), Baade & Zwicky (1934) and Oppenheimer& Volkoff (1939).

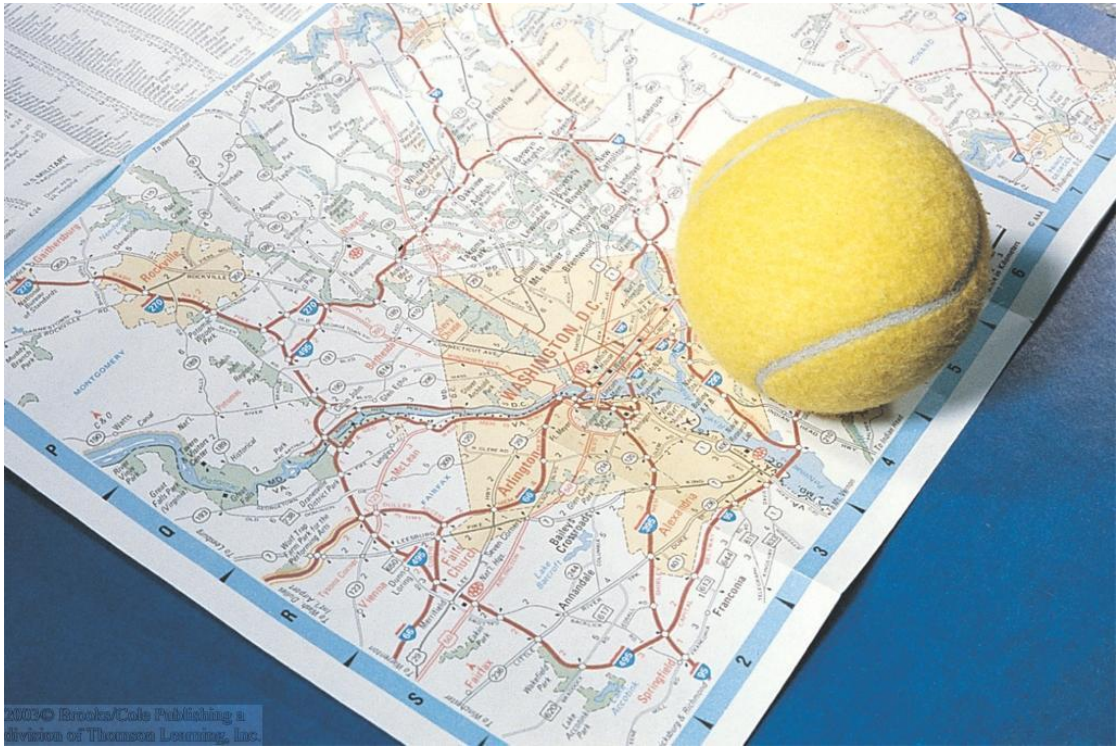
$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

Properties of Neutron Stars

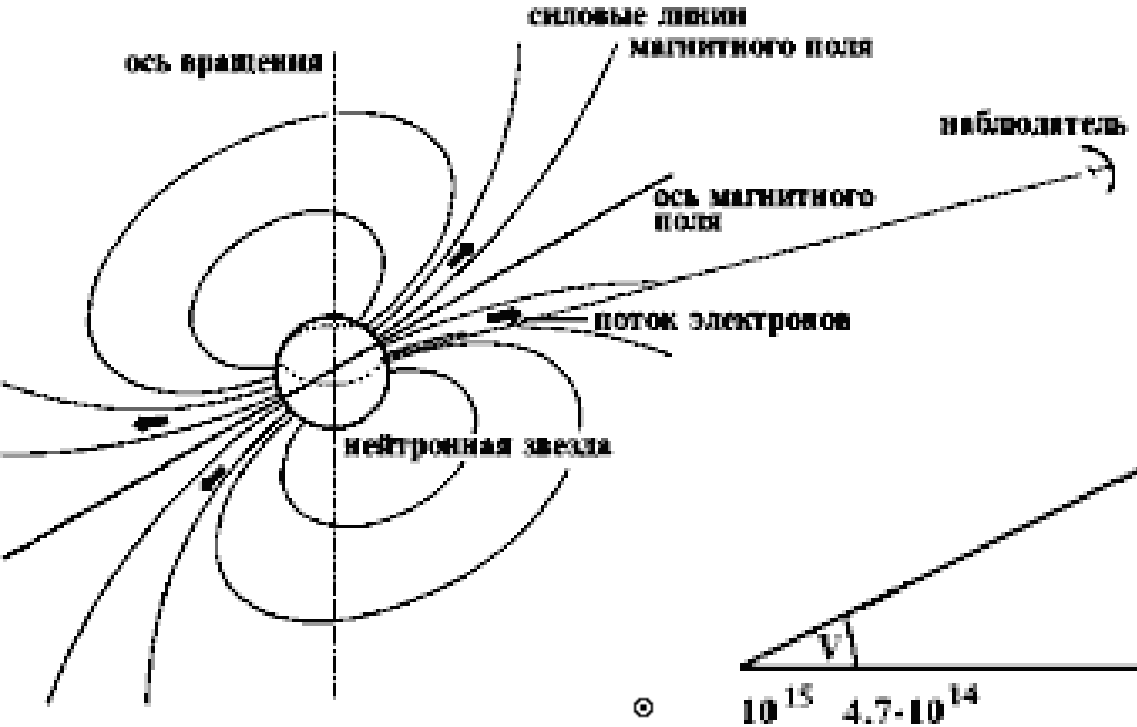
Typical size: R ~ 10 km

Mass: M ~ 1.4 – 3 M_{sun}

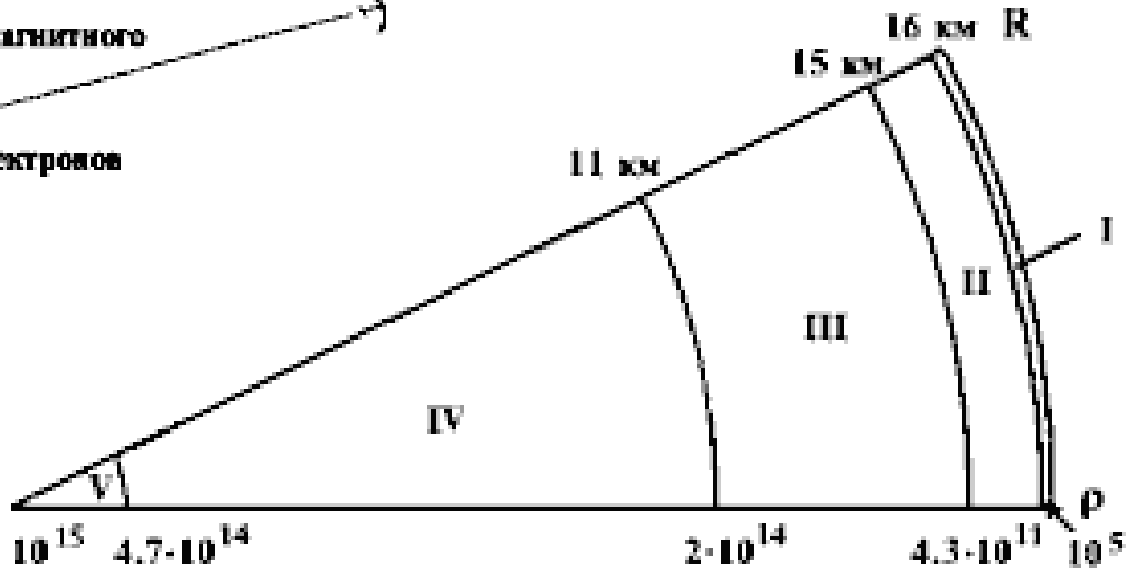
Density: $\rho \sim 10^{14}$ g/cm^3



→ Piece of neutron star matter of the size of a sugar cube has a mass of ~ 100 million tons!!!

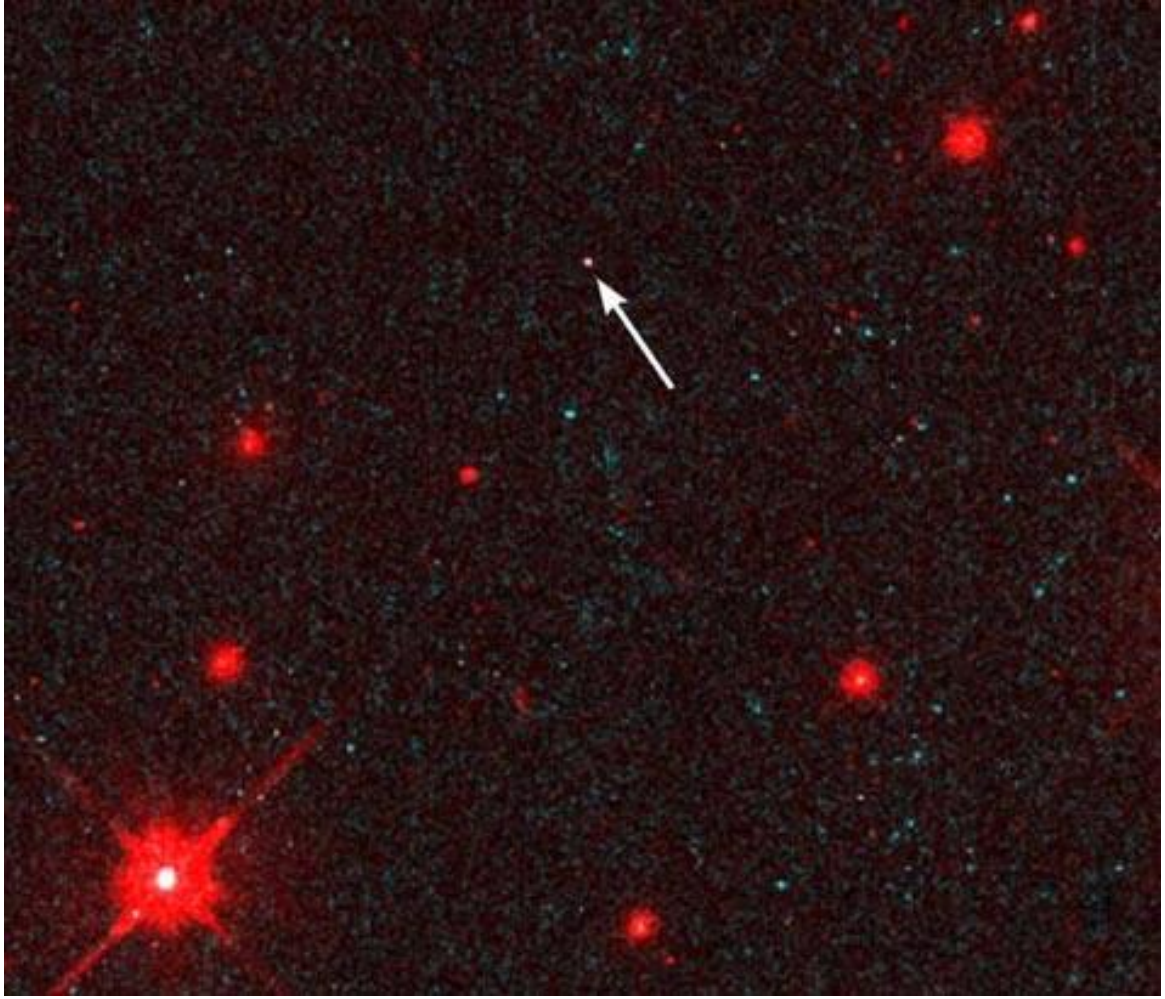


Сечение нейтронной звезды массой 1.4М



Модель пульсара.

I - тонкий внешний слой из плотно упакованных атомов.
В областях II и III ядра расположены в виде объемно-центрированной кубической решетки.
Область IV состоит в основном из нейтронов.
В области V вещество может состоять из пионов и гиперонов, образуя адронную сердцевину нейтронной звезды.



На этой фотографии, полученной на Космическом телескопе им. Хаббла, показана одна из ближайших одиночных нейтронных звезд. Этот очень слабый в оптическом диапазоне объект был первоначально обнаружен в рентгеновском диапазоне спутником ROSAT. Наиболее вероятно, что это молодая нейтронная звезда (моложе миллиона лет), которая постепенно охлаждается, излучая в основном рентгеновские лучи. Однако возможно, что источники, подобные этому, являются старыми нейтронными звездами, которые светятся за счет падения (аккреции) межзвездного вещества на их поверхности.

Крабовидная туманность - остаток взрыва сверхновой, наблюдавшейся в 1054 году. После взрыва кроме туманности, получившей номер 1 в известном каталоге Мессье, образовалась нейтронная звезда, наблюдаемая как радиопульсар. В частях туманности, показанных красным цветом, электроны объединяются с протонами (рекомбинируют), образуя нейтральный водород. В частях, показанных зеленым цветом, электроны излучают, двигаясь по спиральным траекториям в магнитном поле.

- **До сих пор мы с вами обсуждали естественную радиоактивность, т.е. радиоактивность, которой обладают минералы, существующие в природе.**
- **Перейдем к цепочке открытий, которая привела после открытия нейтрона к созданию атомной бомбы и атомных реакторов.**

Law of radioactive decay

- **Activity number of decays per unit time**

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right|.$$

- **decay constant λ probability of decay per unit time**

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

- **Rate of decay ∝ number N of nuclei**

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Problems of radioactive decay

- Alfa decay – penetration of He nuclear through electromagnetic barrier (no problems)
- Beta decay - electron can’t be ejected from nuclear as it has negative charge
- Mass difference for mother and daughter nuclear is $M(z+1)-M(z)= E_{max}$
- Problem of energy conservation – ejected energy is equal to mean energy of spectrum instead of E_{max} (Calorimeter measurements)

Beta decay problem

$$A \rightarrow (A \pm 1) + e^{\mp}$$

The neutrino (Pauli, 1930)

Нейтрино

- **В конце 1930 года на конференции физиков в Тюбингенском университете огласили письмо Паули от 4 декабря. Оно было адресовано Гансу Гейгеру и Лизе Мейтнер, но предназначено для всех участников:**

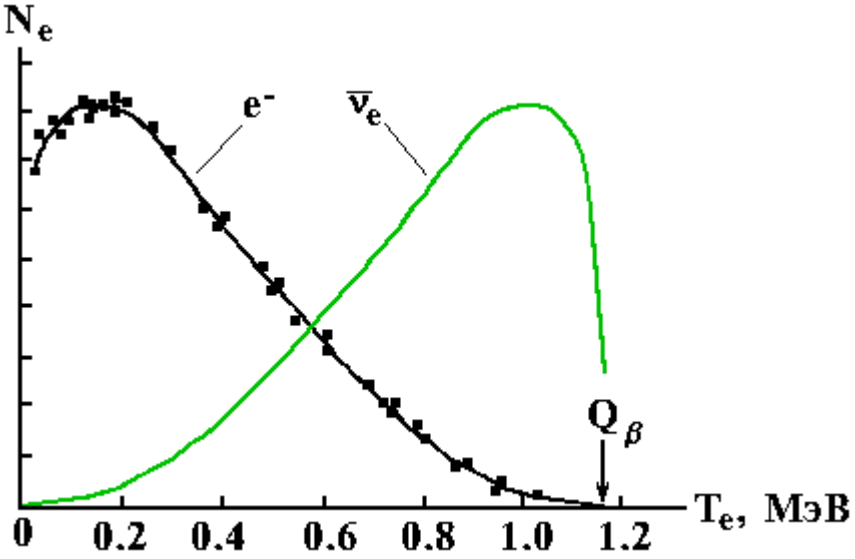
  "Дорогие радиоактивные дамы и господа. Я прошу Вас выслушать со вниманием в наиболее удобный момент посланца, доставившего это письмо. Он расскажет Вам, что я нашел отличное средство для закона сохранения и правильной статистики. Оно заключается в возможности существования электрически нейтральных частиц... Непрерывность β-спектра станет понятной, если предположить, что при β-распаде вместе с каждым электроном испускается такой "нейтрон", причем сумма энергий "нейтрона" и электрона постоянна..."

- **Письмо заканчивалось так:**

  "Не рисковать - не победить. Тяжесть положения при рассмотрении непрерывного β -спектра становится особенно яркой после слов проф. Дебая, сказанных мне с сожалением: "Ох, лучше не думать обо всем этом... как о новых налогах". Следовательно, необходимо серьезно обсудить каждый путь к спасению. Итак, уважаемый радиоактивный народ, подвергните это испытанию и судите".

Beta decay problem

$$A \rightarrow (A \pm 1) + e^{\mp}$$



$$A \rightarrow (A \pm 1) + e^{\mp} + \nu(\bar{\nu})$$

The neutrino (Pauli, 1930)

ПАУЛИ (Pauli), Вольфганг
25 апреля 1890 г. – 15 декабря 1958 г.
Нобелевская премия по физике, 1945 г.

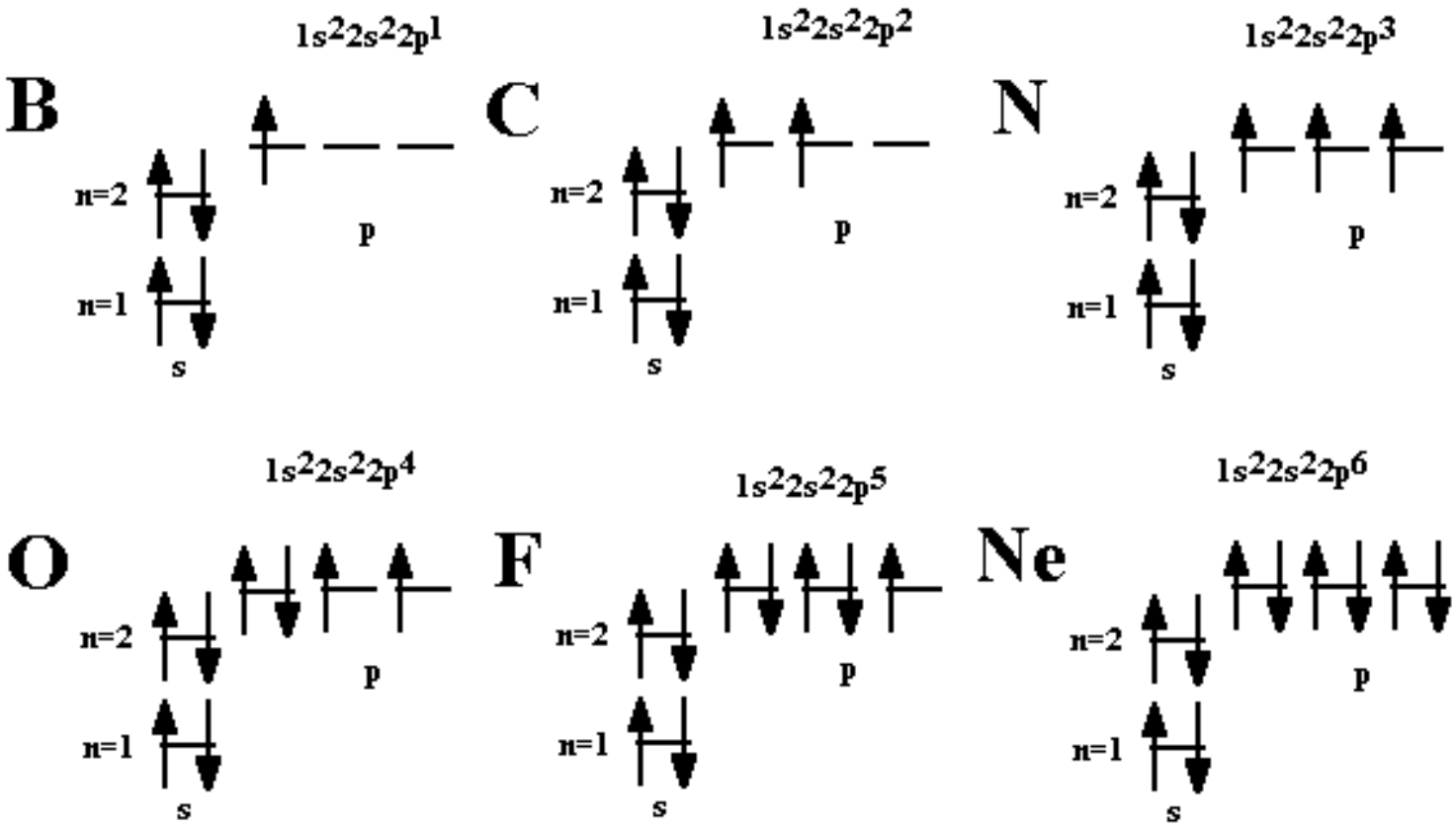
- **Австрийско-швейцарский физик Вольфганг Эрнст Паули родился в Вене. Его отец, Вольфганг Йозеф Паули, был известным физиком и биохимиком, профессором коллоидной химии в Венском университете. Его мать, Берта (в девичестве Шютц) Паули, была писательницей, связанной с венскими театральными и журналистскими кругами. Герта, младшая сестра П., стала актрисой и писательницей. Эрнст Мах, знаменитый физик и философ, был его крестным отцом. В средней школе в Вене П. проявил незаурядные математические способности, однако, находя классные занятия скучными, он переключился на самостоятельное изучение высшей математики и поэтому сразу прочитал только что опубликованную работу Альберта Эйнштейна по общей теории относительности.**
- **Он выдвинул предположение, что электроны обладают неким свойством, которое позже Сэмюэл Гаудсмит и Джордж Уленбек назвали спином, или собственным угловым моментом. В магнитном поле у спина электрона имеются две возможные ориентации: ось спина может быть направлена в ту же сторону, что и поле, или в противоположную сторону. Орбитальное движение электрона в атоме определяет еще одну ось, которая может быть ориентирована по-разному в зависимости от приложенного внешнего поля. Различные возможные комбинации спиновой и орбитальной ориентации слегка отличаются энергетически, что приводит к увеличению числа атомных энергетических состояний. Переходы электрона с каждого из этих подуровней на некоторую другую орбиту соответствуют слегка отличающимся длинам световых волн, чем и объясняется тонкое расщепление спектральных линий.**
- **Он сформулировал закон, который стал известен как принцип запрета Паули и согласно которому никакие два электрона в системе не могут иметь одинаковые наборы квантовых чисел. Так, каждая оболочка в атоме может содержать лишь ограниченное число электронных орбит, определяемых допустимыми значениями квантовых чисел.**

Закономерности формирования электронных структур

- **Принцип наименьшей энергии:** электрон размещается на АО с min энергией
- **Принцип Паули**: в атоме не может быть двух электронов с одинаковым набором 4-х кв.чисел
- **Правила Гунда**: (1) на одном подуровне сумма спинов электронов максимальна, (2) сумма магнитных кв-х чисел максимальна.

MyShared

Правила Гунда



Ты приглядись, решив присесть,
К местам трамвайного вагона:
Когда ряды пустые есть,
Подсаживаться нет резона.

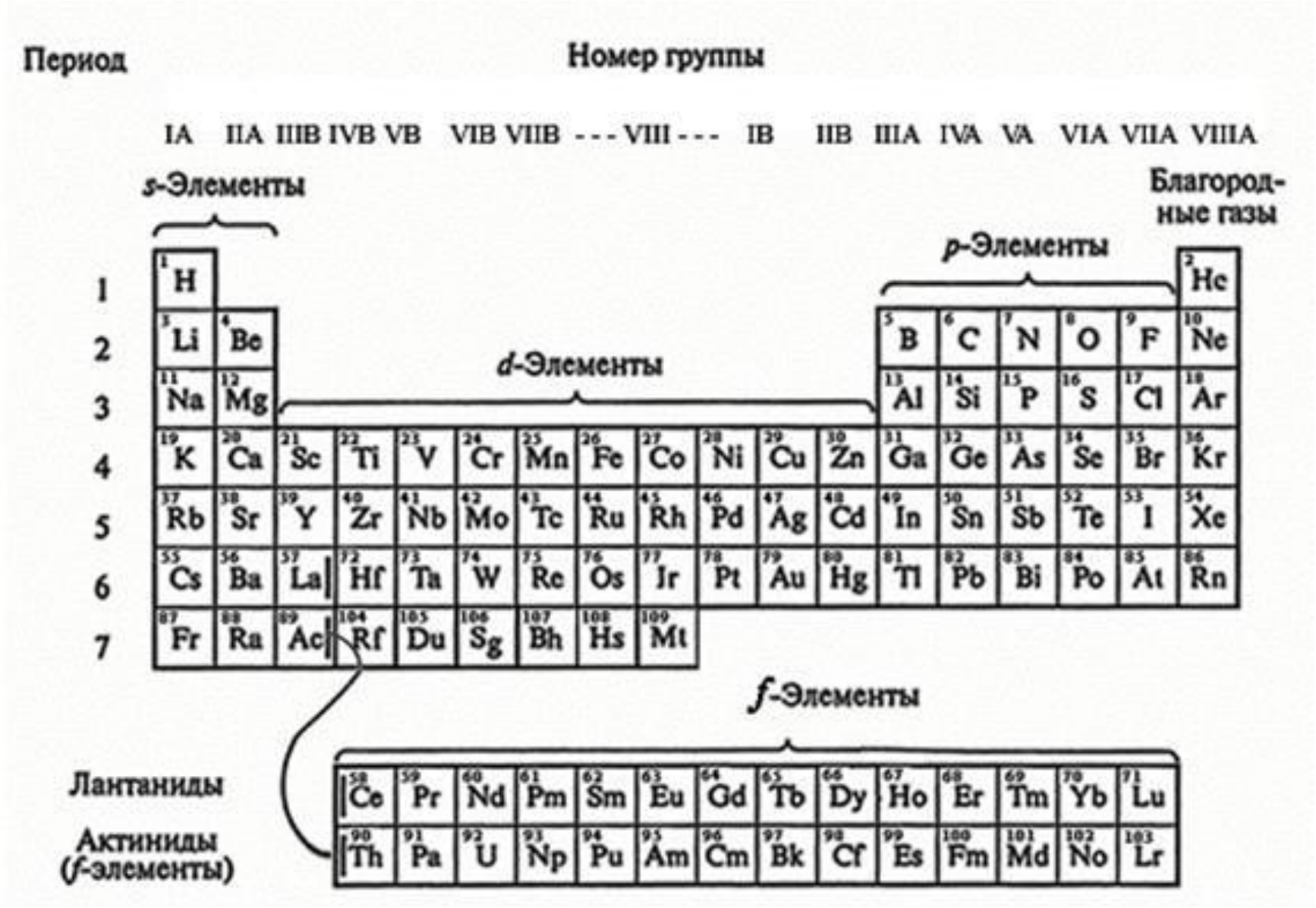


Рис. 3. Таблица Менделеева.

Нобелевская премия по химии (1935 г.)

«За выполненный синтез новых радиоактивных элементов»

Фредерик Жолио-Кюри

(**Frédéric Joliot** 1900 – 1958)

Ирен Жолио-Кюри

(**Irène Joliot-Curie** 1897 – 1956)

Искусственную радиоактивность открыли супруги Ирен (1897—1956) и Фредерик (1900— 1958) Жолио-Кюри. 15 января 1934 года их заметка была представлена Ж. Перреном на заседании Парижской Академии наук. Ирен и Фредерик установили, что после бомбардировки альфа-частицами некоторые легкие элементы — магний, бор, алюминий — испускают позитроны.

Далее они попытались установить механизм этого испускания, которое отличалось по своему характеру от всех известных в то время случаев ядерных превращений. Ученые поместили источник альфа-частиц (препарат полония) на расстоянии одного миллиметра от алюминиевой фольги и подвергли ее облучению в течение примерно десяти минут. Счетчик Гейгера — Мюллера показал, что фольга испускает излучение, интенсивность которого падает во времени по экспоненциальной зависимости с периодом полураспада 3 минуты 15 секунд. В экспериментах с бором и магнием периоды полураспада составили 14 и 2,5 минут соответственно.

А вот при опытах с водородом, литием, углеродом, бериллием, азотом, кислородом, фтором, натрием, кальцием, никелем и серебром таких явлений не обнаруживалось.

Нобелевская премия по физике (1938 г.)

«*За демонстрацию существования новых радиоактивных элементов, созданных облучением нейтронов, и за связанное с этим открытие ядерных реакций*, *вызванных медленными нейтронами*»

Энрико Ферми

(Enrico Fermi 1901 – 1954)

Итало-американский физик Энрико Ферми родился в Риме. Он был младшим из трех детей железнодорожного служащего Альберте Ферми и урожденной Иды де Гаттис, учительницы. Еще в детстве Ф. обнаружил большие способности к математике и физике. Его выдающиеся познания в этих науках, приобретенные в основном в результате самообразования, позволили ему получить в 1918 г. стипендию и поступить в Высшую нормальную школу при Пизанском университете. Уже через четыре года, в 1922 г., Ф. получил докторскую степень по физике с отличием за работу по экспериментальному исследованию рентгеновских лучей. По возвращении в Рим Ф. получил от итальянского правительства стипендию, позволившую ему продолжать изучение современной физики в Германии, у Макса Борна, возглавлявшего в то время отделение теоретической физики Геттингенского университета, и в Голландии, у Пауля Эренфеста в Лейденском университете.

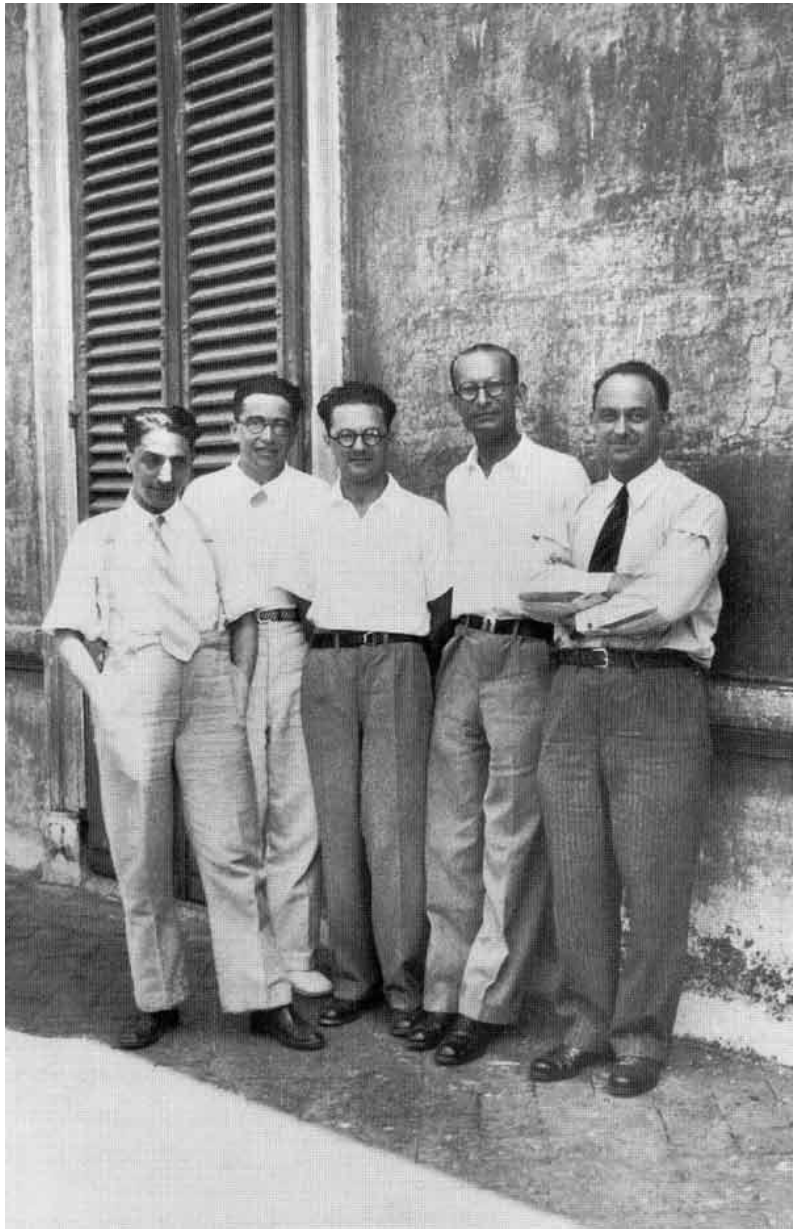
В 1926 г. им была разработана новая разновидность статистической механики, подсказанная принципами запрета Вольфганга Паули. Она позволяла успешно описывать поведение электронов, а позднее была применена к протонам и нейтронам. Статистика Ф. позволила лучше понять электропроводность металлов и привела к построению более эффективной модели атома.

В 1933 г. он предложил теорию бета-распада, позволившую объяснить, каким образом ядро спонтанно испускает электроны и роль нейтрино-частиц, лишенных электрического заряда и не поддававшихся тогда экспериментальному обнаружению. Существование таких частиц было постулировано Паули, а название придумано Ф. (Нейтрино было экспериментально обнаружено в 1956 г.). Теория бета-распада Ф. затрагивала новый тип сил, получивших название слабого взаимодействия. Такие силы действуют между нейтронами и протонами в ядре и обусловливают бета-распад, Статья Ф. о бета-распаде была отвергнута из-за своей новизны английским журналом «Нейче», но опубликована в итальянском и в немецком журналах.

Об искусственной радиоактивности Энрико Ферми (1901—1954) узнал сразу же, весной 1934 года, как только супруги Жолио-Кюри опубликовали свои результаты. Ферми решил повторить опыты Жолио-Кюри, но пошел совершенно иным путем, применив в качестве бомбардирующих частиц нейтроны. «Нейтронные пушки» Ферми представляли собой маленькие стеклянные радон-бериллиевые ампулы длиной несколько сантиметров.

В 1-ом сообщении, от 25 марта 1934 года, Ферми сообщил, что бомбардируя алюминий и фтор, получил изотопы натрия и азота, испускающие электроны (а не позитроны, как у Жолио-Кюри). Метод нейтронной бомбардировки оказался очень эффективным, и Ферми писал, что эта высокая эффективность в осуществлении расщепления «вполне компенсирует слабость существующих нейтронных источников по сравнению с источниками альфа-частиц и протонов».

С помощью своей «нейтронной пушки» Ферми подверг бомбардировке фтор, алюминий, кремний, фосфор, хлор, железо, кобальт, серебро и йод. Все эти элементы активировались, и во многих случаях Ферми мог указать химическую природу образовавшегося радиоактивного элемента. Ему удалось этим методом активировать 47 из 68 изученных элементов.



Знаменитая «группа Ферми» (1934 г.)

22 октября 1934 года **Ферми сделал фундаментальное открытие. Поместив между источником нейтронов и активируемым серебряным цилиндром парафиновый клин, Ферми заметил, что клин не уменьшает активность серебра, а наоборот – увеличивает ее. Ферми сделал вывод, что этот эффект, по-видимому, обусловлен наличием водорода в парафине, и решил проверить, как будет влиять на активность большое количество водородсодержащих элементов. Проведя опыт сначала с парафином, потом с водой, Ферми констатировал увеличение активности в сотни раз. Опыты Ферми обнаружили огромную эффективность медленных нейтронов.**

Когда в Физическом институте Римского университета в середине 1934 года молодой Ферми начал бомбардировать уран нейтронами, он, конечно, исходил только из существования ^{238}U (с помощью масс-спектрографа Астона в то время не удавалось найти другие изотопы урана, кроме ^{238}U) . Если бы, как полагал Ферми, удалось внедрить в ядро еще один нейтрон, то по уравнению

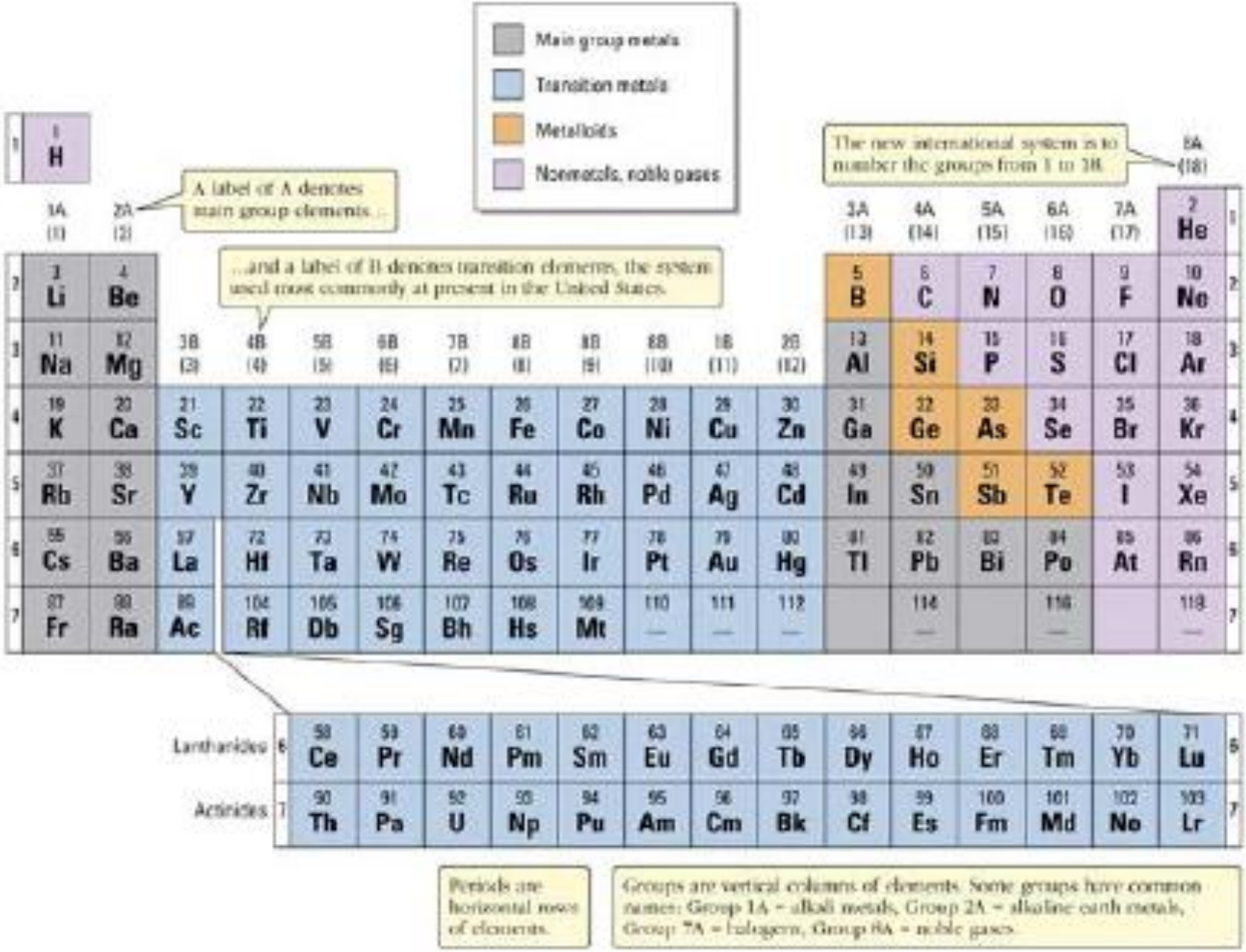
$$^{238}U + n = {}^{239}U$$

образовался бы радиоактивный изотоп с массовым числом 239 и - в случае его дальнейшего бета-распада - элемент с зарядом ядра 93:

$$^{239}U = {}^{239}X + e^{-}$$

Такого вещества на Земле еще не было! Воодушевлению итальянцев не было границ, когда с первым же опытом пришла удача: облученный уран оказался сильно радиоактивным и, как предполагалось, испускал бета-лучи. Исследования показали, что продукты радиоактивного распада не идентичны с соседними элементами урана, такими, как протактиний, торий, актиний, радий. Исходя из этого, новый вид радиоактивных атомов должен был принадлежать элементам, находящимся по другую сторону урана - трансуранам!

По мнению Ферми, особенно правомерным было приписать образовавшийся радиоактивный осадок с периодом полураспада 13 мин новому, 93-му, элементу.


Main group metals
Transition metals
Metalloids
Nonmetals, noble gases
A label of A denotes main group elements...
...and a label of B denotes transition elements, the system used most commonly at present in the United States.
The new international system is to number the groups from 1 to 18.
Lanthanides
Actinides
Periods are horizontal rows of elements.
Groups are vertical columns of elements. Some groups have common names: Group 1A = alkali metals, Group 2A = alkaline earth metals, Group 7A = halogens, Group 8A = noble gases.

Ida Noddack-Tacke
1896 - 1978

Вокруг открытия 93-го элемента грозил опять возникнуть спор о приоритете. Ибо в июле 1934 года чешский инженер Коблик сообщил что он выделил этот элемент из урановой смолки Иоахимсталя и уже определил его относительную атомную массу: 240. В честь своей родины Кублик назвал его богемий. Это известие было распространено газетами по всему свету. Открытие элемента 93, заявленное с двух сторон, было, конечно, сенсацией. Однако Ида Ноддак не разделяла всеобщего воодушевления. Госпожа Ноддак сохранила критическую точку зрения на такие "открытия". Она сообщила, что богемий является не чем иным, как смесью соединений ванадия и вольфрама. Не может быть и речи о новом элементе.

Ноддак оказалась права. Доказательства Ферми также не были убедительными; по её мнению, было бы ошибочным делать заключение о существовании элемента 93 только на том основании, что не были обнаружены в качестве возможных продуктов элементы, соседние с ураном!

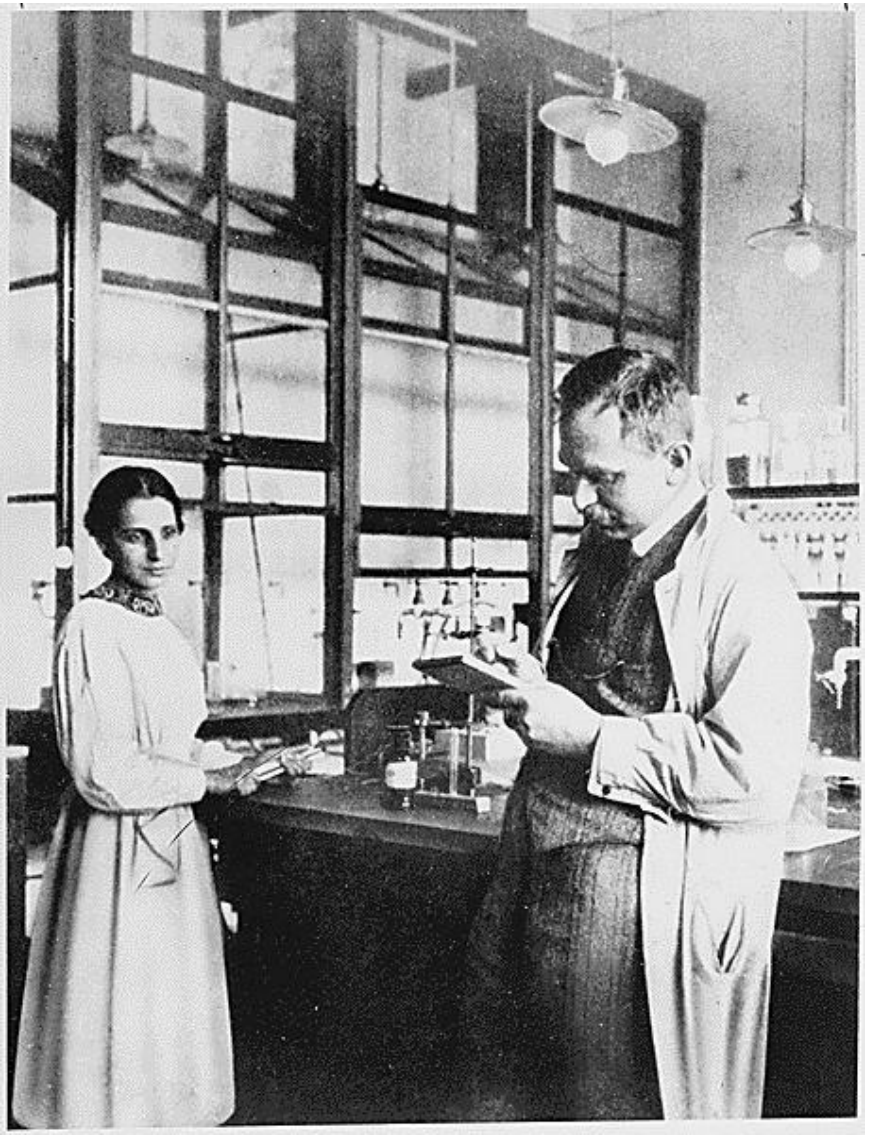
Конечно, в уже известных ядерных превращениях всякий раз возникали изотопы либо того же, либо соседнего элемента. Однако это не всегда может быть так. Можно с тем же успехом принять,- делала Ноддак логичный вывод,- что при таких, ранее не известных, разрушениях ядра - с помощью нейтронов - могут в значительной мере происходить другие ядерные реакции, не те, которые... наблюдались до сих пор.

Думается, что при обстреле тяжелых ядер нейтронами эти ядра развалятся на несколько больших частей, которые как раз могут быть изотопами известных элементов, но не соседних с облученными". Рассуждения Иды Ноддак должны были бы, как искра в стоге сена, перенестись к физикам-атомщикам. Однако "ученые мужи" остались равнодушными. "*То, что не может быть, физически не должно быть*", и никто не давал на это своего благословения, как и на смелое предположение Иды Ноддак, высказанное в 1934 году, согласно которому ядро урана могло самым настоящим образом распасться.

Спрошенный позднее Отто Ган довольно мрачно заявил, что он в то время даже не рисковал цитировать гипотезу Ноддак, казавшуюся абсурдной, ибо опасался за свою репутацию ученого.

Только совместные усилия физиков и химиков могли дать ответ

- Chemists and physicists collaborate…the cast includes:
  - Lise Meitner (Austrian-Swedish, 1878-1968)
  - Otto Frisch – Meitner's nephew and Niels Bohr's student – (Austrian, 1904-1979)
  - Otto Hahn (German, 1871-1968; Nobel in 1944)
  - Fritz Strassman (German, 1902-1980)



Отто Ган и Лиза Мейтнер в лаборатории. 1913 год

Эйнштейн называл Лизу Майтнер (Lise Meitner, 1878 – 1968) «наша Мария Кюри». Она первой осознала возможность расщепления ядра. Первые эксперименты немецкого химика Отто Гана (Otto Hahn, 1879 – 1968) по ядерному делению в 1938-39 гг. были спланированы им совместно с Майтнер (сам Ган не верил в возможность ядерного деления).

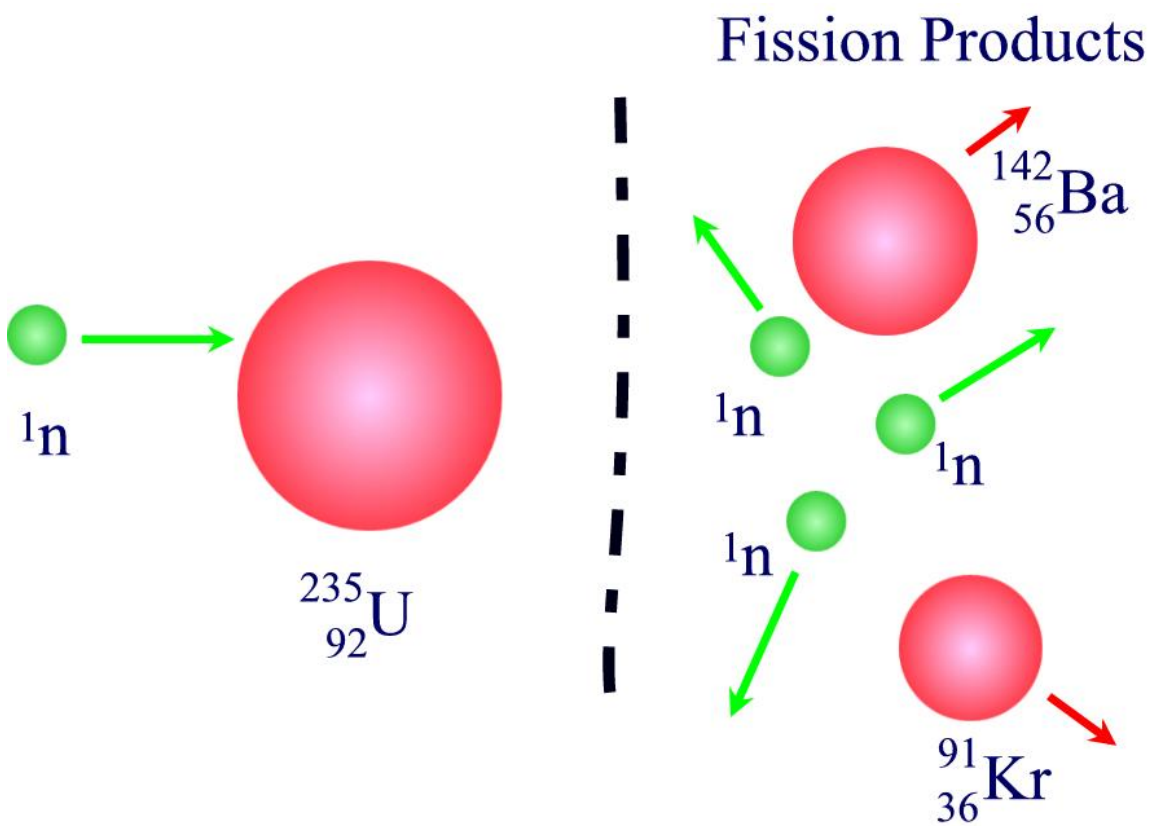
В 1939 г. Майтнер совместно со своим племянником Отто Фришем дала физическое объяснение экспериментам Гана и назвала процесс «ядерным делением».

В 1945 г. Нобелевская премия по химии (за 1944 г.) за открытие деления тяжелых ядер досталась одному Гану.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 [illegible]	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn								

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Nuclear Energy - Fission



+ about 200 MeV energy

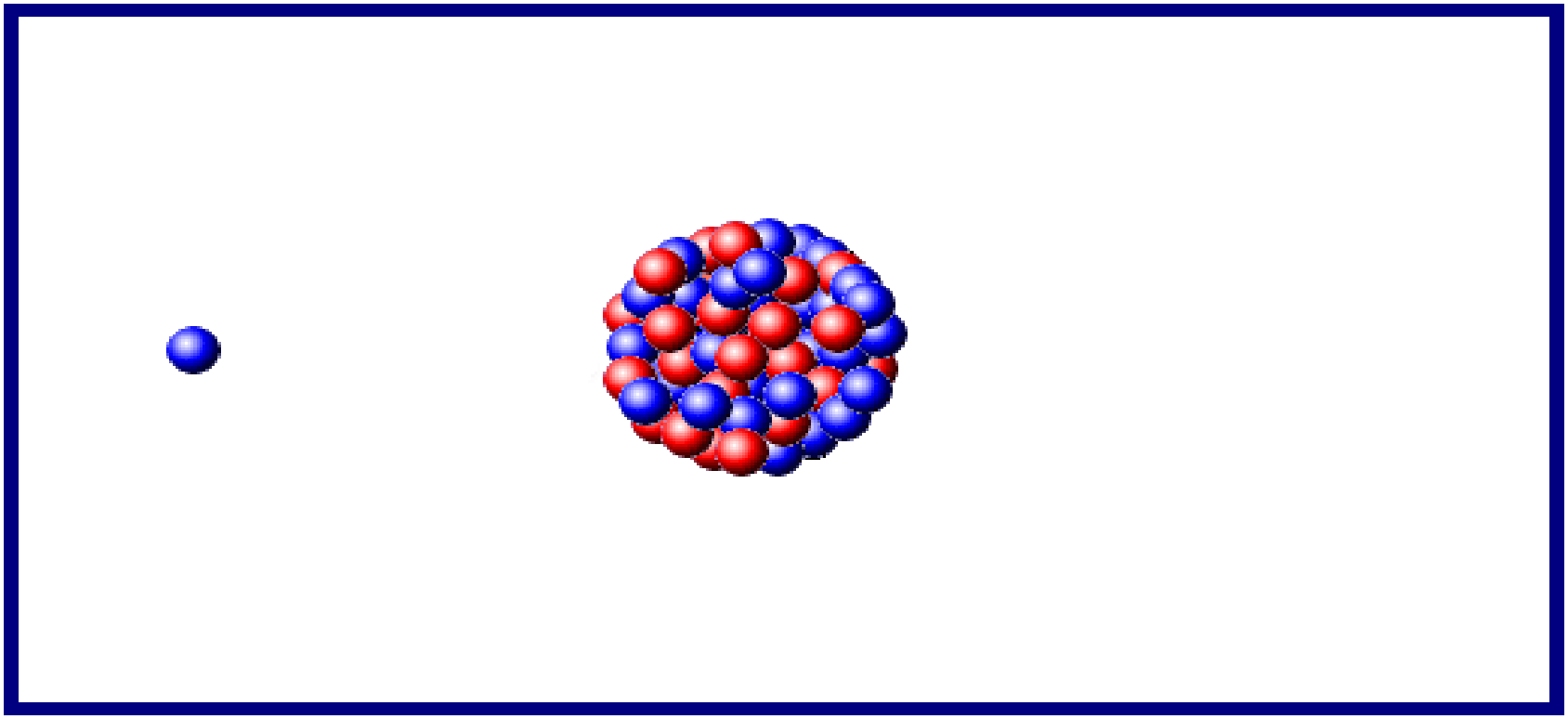
Нобелевская премия по химии (1944 г.)

«За открытие расщепления тяжёлых атомных ядер»

Отто Ган

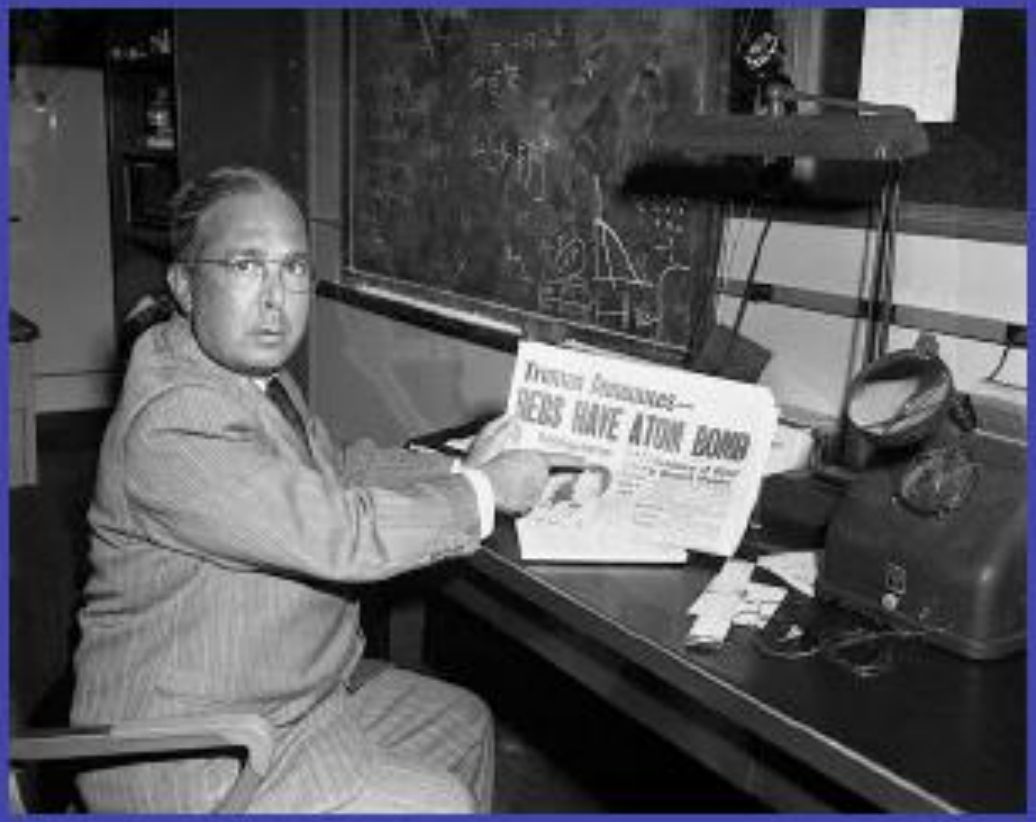
(Otto Hahn, 1879—1968)

Fission



The Vision of Leo Szilard

- Leo Szilard (Hungarian, 1898-1964)
- Physicist, inventor, activist, visionary



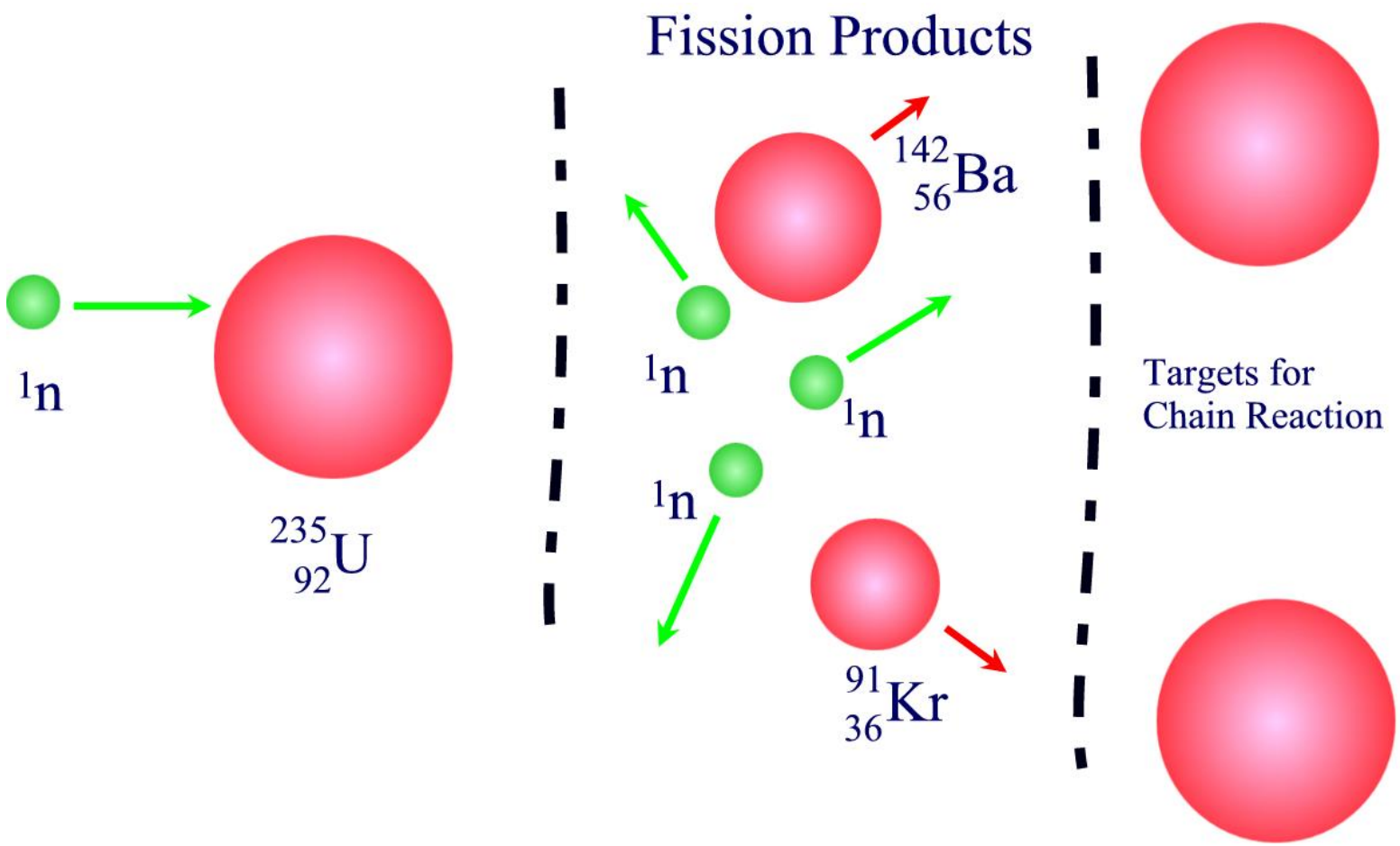
- On September 12, 1933, Szilard – an exile from Hitler's Germany – is getting waiting for the light to change before crossing a street in London….conceives the idea of a neutron chain reaction.

"As the light changed to green and I crossed the street, it suddenly occurred to me that if we could find an element which is split by neutrons and which would emit two neutrons when it absorbs one neutron, such an element, if assembled in sufficiently large mass could sustain a nuclear chain reaction…

- "…In certain circumstances, it might be possible to set up a nuclear chain reaction, liberate energy on an industrial scale, and construct atomic bombs."

- "If the thickness is larger than the critical value…I can produce an explosion."
  - Szilard's July 4, 1934 patent application which contains general descriptions of key features such as *critical mass*, *chain reaction*, etc.

Nuclear Energy - Fission

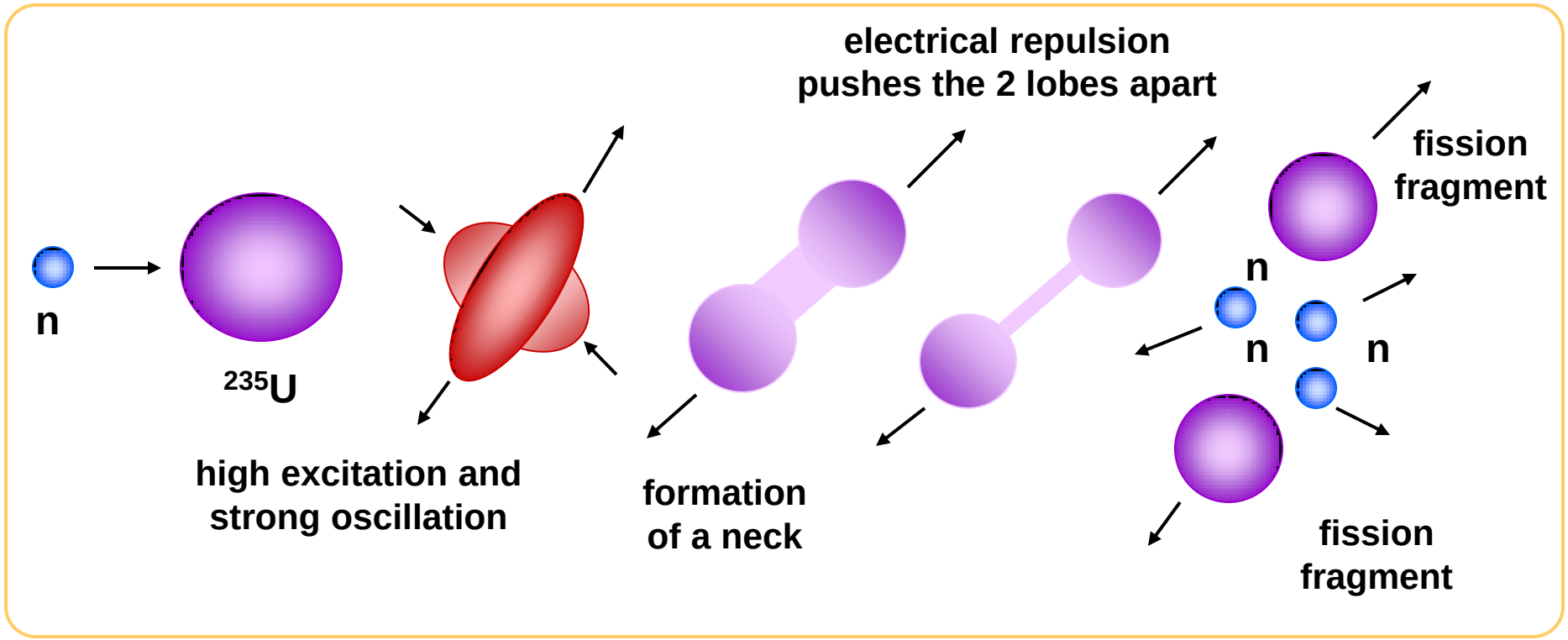


+ about 200 MeV energy

A-2 Induced Fission – 2

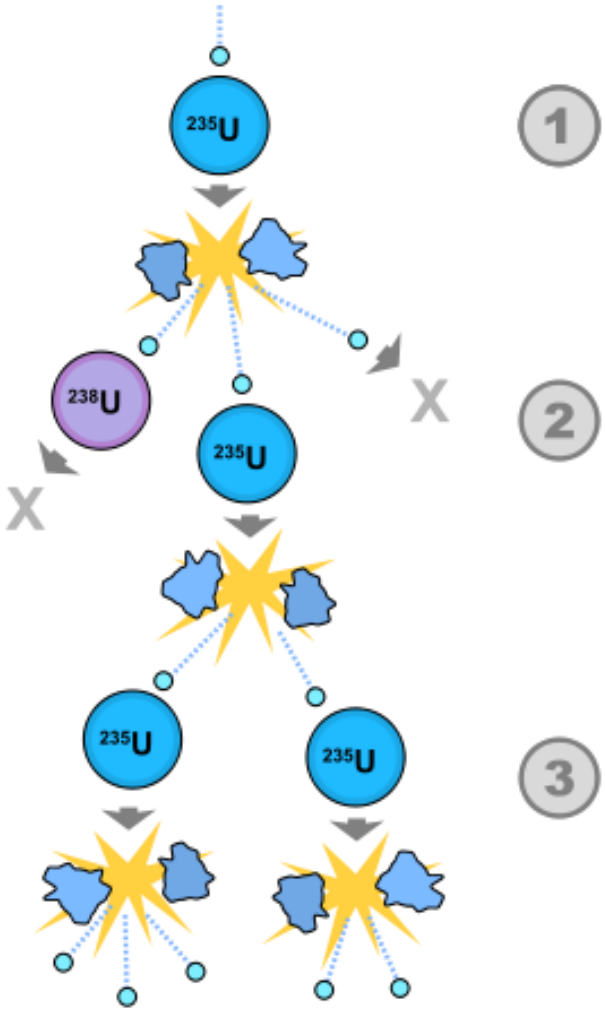
Liquid-drop picture

Fission can be qualitatively understood on the basis of the liquid-drop model



Note: fission liberates about 200 MeV per atom!

Цепная реакция



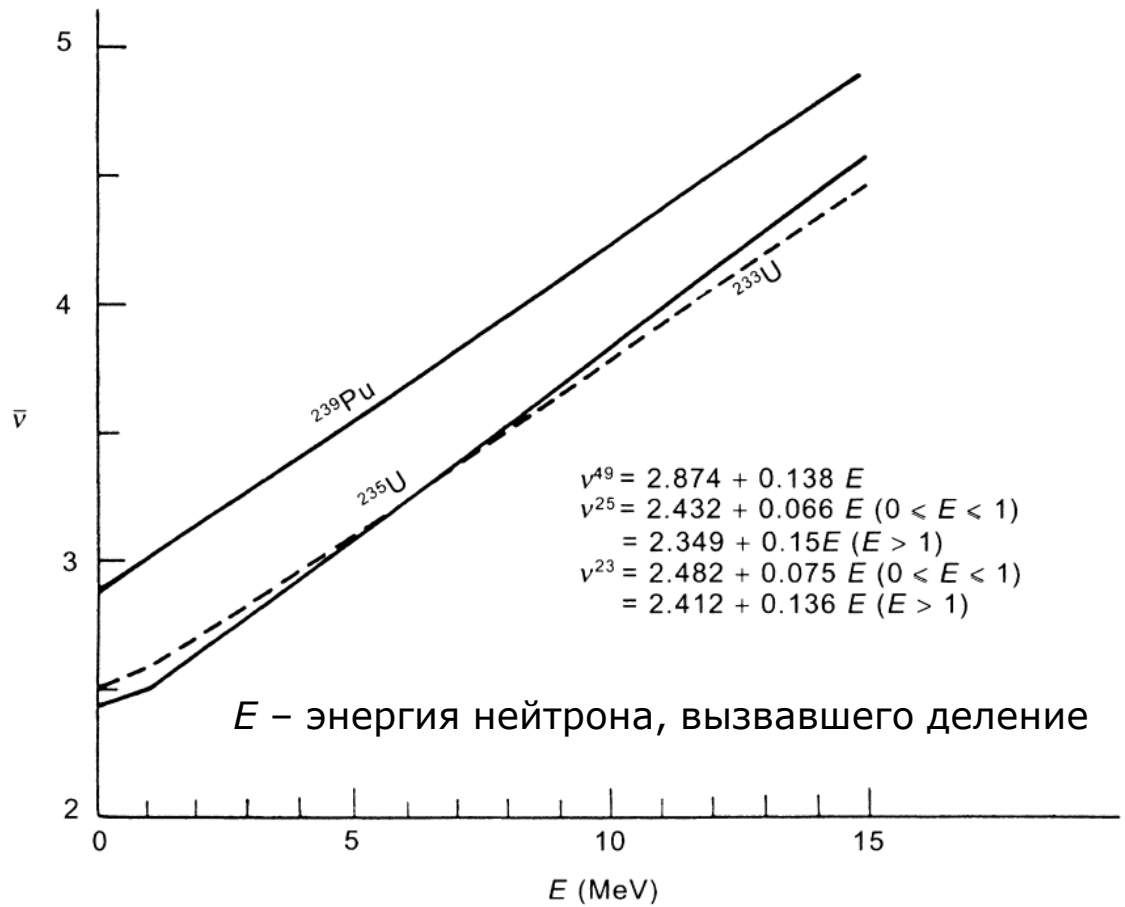


Fig. 1.10 Average number of neutrons emitted per fission.

$$^{235}U + neutron \rightarrow fission\ fragments + 2.4\ neutrons + 192.9\ MeV$$

$$^{239}Pu + neutron \rightarrow fission\ fragments + 2.9\ neutrons + 198.5\ MeV$$

Критические параметры

Для конечной среды (активной зоны) коэффициент размножения $k=k_0w$, где w учитывает утечку нейтронов за пределы среды. Очевидно, что в силу утечки $k<k_0$. Поглощение нейтронов в активной зоне $\sim l^3$, где l – эффективный линейный размер зоны, а утечка $\sim l^2$. Таким образом, $w\sim l^3/l^2=l$.

Значение k определяет течение цепной реакции:

• ***k* < 1** (*докритическая масса*): Система не может поддерживать цепную реакцию, т.е последняя затухает со временем. На каждое индуцированное в системе деление за все время приходится в среднем $1/(1-k)$ делений.

• ***k* = 1** (*критическая масса*): Каждое деление вызывает еще одно деление в следующем поколении и т.д. (Ядерные реакторы работают в режиме $k=1$).

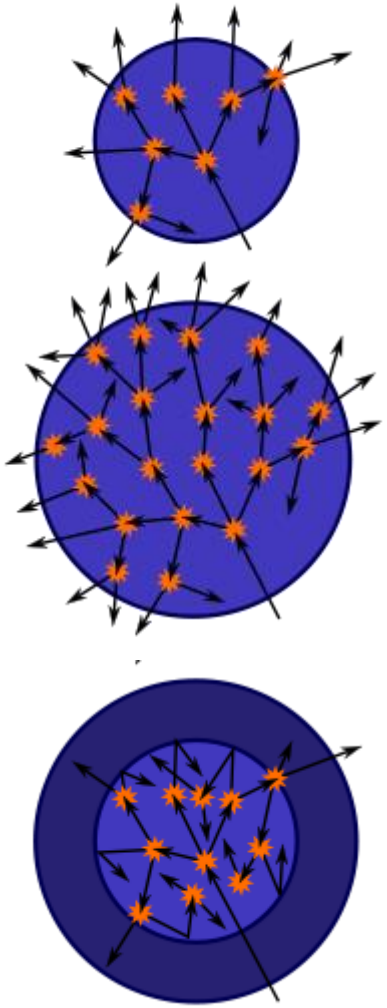
• ***k* > 1** (*сверхкритическая масса*): Каждое деление вызывает еще k делений в следующем поколении. (Атомная бомба «работает» в режиме $k>1$).

Критическая масса $M_{кр}$ связана с *критической длиной*: $M_{кр}\sim l_{кр}^{x}$, где x зависит от формы образца и лежит в пределе от 2 до 3.

Альбедо нейтронов.

Интересным свойством нейтронов является их способность отражаться от различных веществ. Это отражение не когерентное, а диффузное. Его механизм таков. Нейтрон, попадая в среду, испытывает беспорядочные столкновения с ядрами и после ряда столкновений может вылететь обратно. Вероятность такого вылета носит название *альбедо* нейтронов для данной среды.

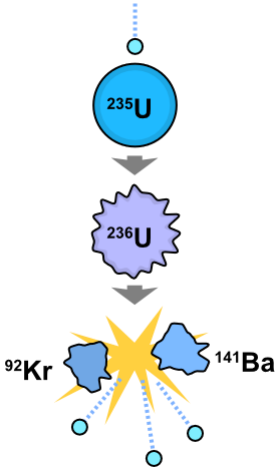
Isotope	Critical Mass	Diameter
protactinium-231	750±180 kg	45±3 cm
uranium-233	15 kg	11 cm
uranium-235	52 kg	17 cm
neptunium-236	7 kg	8.7 cm
neptunium-237	60 kg	18 cm
plutonium-238	9.04–10.07 kg	9.5-9.9 cm
plutonium-239	10 kg	9.9 cm
plutonium-240	40 kg	15 cm
plutonium-241	12 kg	10.5 cm
plutonium-242	75–100 kg	19-21 cm
americium-241	55–77 kg	20-23 cm
americium-242m	9–14 kg	11-13 cm
americium-243	180–280 kg	30-35 cm
curium-243	7.34–10 kg	10-11 cm
curium-244	(13.5)–30 kg	(12.4)–16 cm
curium-245	9.41–12.3 kg	11-12 cm
curium-246	39–70.1 kg	18-21 cm
curium-247	6.94–7.06 kg	9.9 cm
californium-249	6 kg	9 cm
californium-251	5 kg	8.5 cm



Наверху: Докритическая.

В середине: Критическая.

Внизу: Докритическая масса, окруженная отражателем.

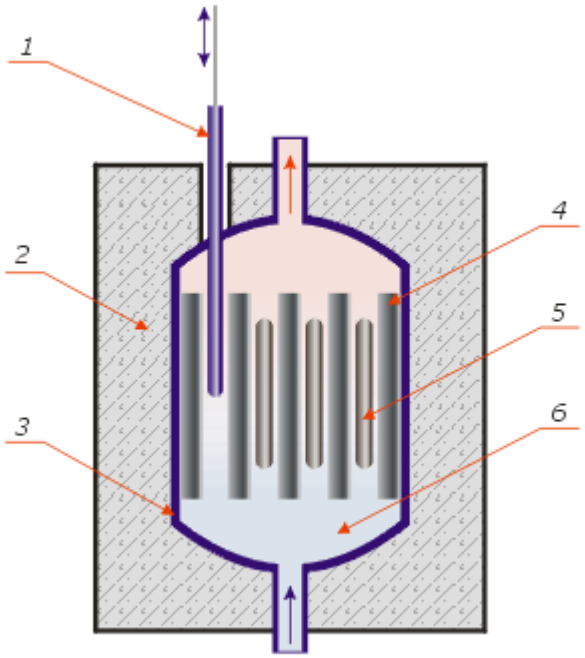


Энергия деления

$$\frac{E}{c^2} = m_{original} - m_{final}$$

Isotope	Thermal Neutron	Fission Neutron
^{233}U	190.0	–
^{235}U	192.9	–
^{239}Pu	198.5	–
^{241}Pu	200.3	–
^{232}Th	–	184.2
^{234}U	–	188.9
^{236}U	–	191.4
^{238}U	–	193.9
^{237}Np	–	193.6
^{238}Pu	–	196.9
^{240}Pu	–	196.9
^{242}Pu	–	200.0

Ядерный реактор



Для начала цепной реакции обычно достаточно нейтронов, рождаемых при спонтанном делении ядер урана. Возможно также использование внешнего источника нейтронов для запуска реактора, например, смеси Ra и Be, ^{252}Cf или других веществ.

Схематическое устройство гетерогенного реактора на тепловых нейтронах

1 — управляющий стержень;

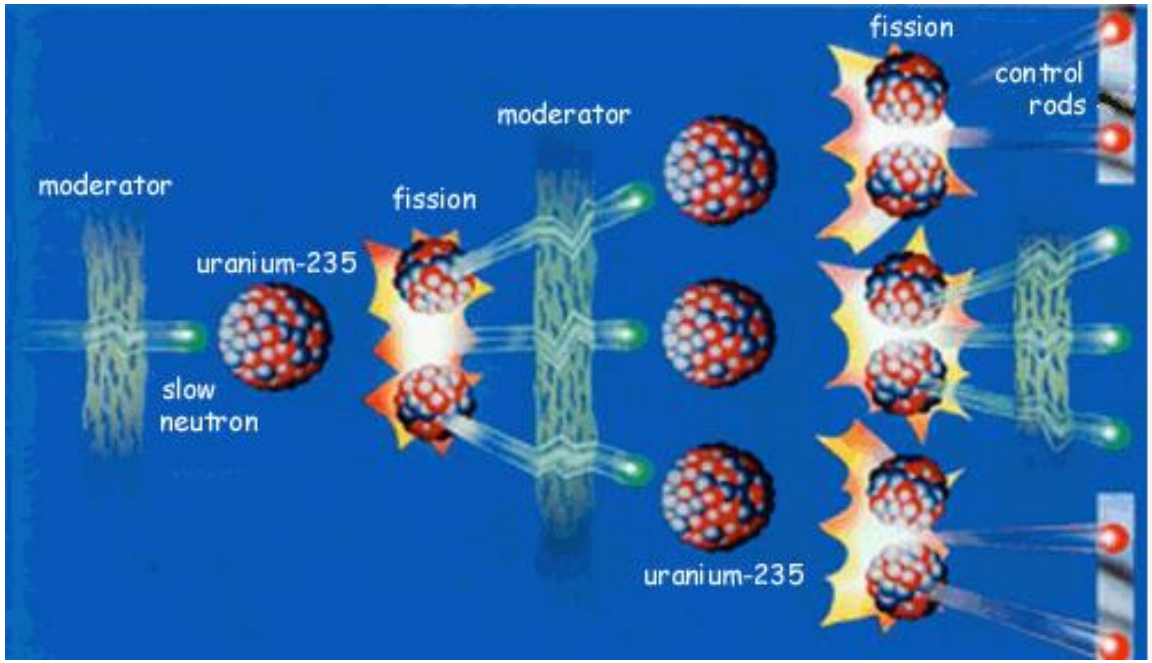
2 — биологическая защита;

3 — тепловая защита;

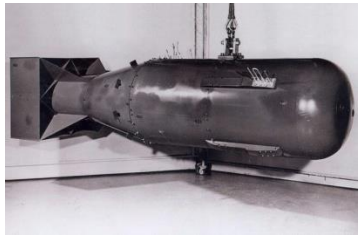
4 — замедлитель;

5 — ядерное топливо;

6 — теплоноситель.



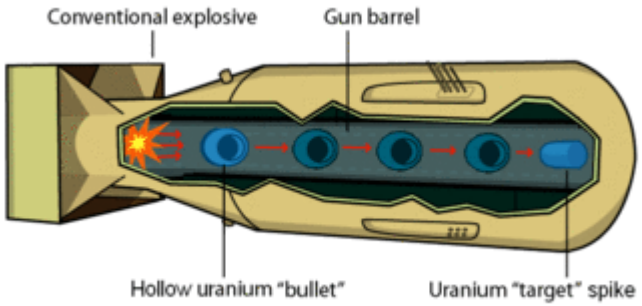
Атомная бомба

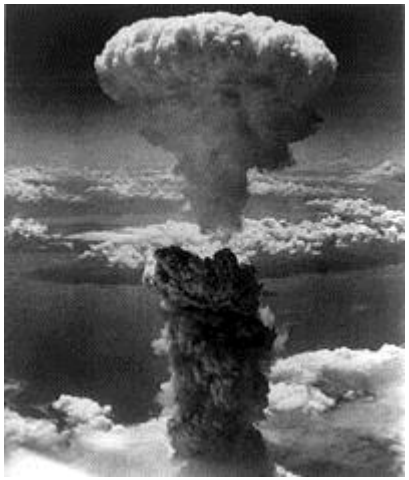


Little Boy

Ядерный взрыв, если $k>1+\mu$!

«Пушечная» схема

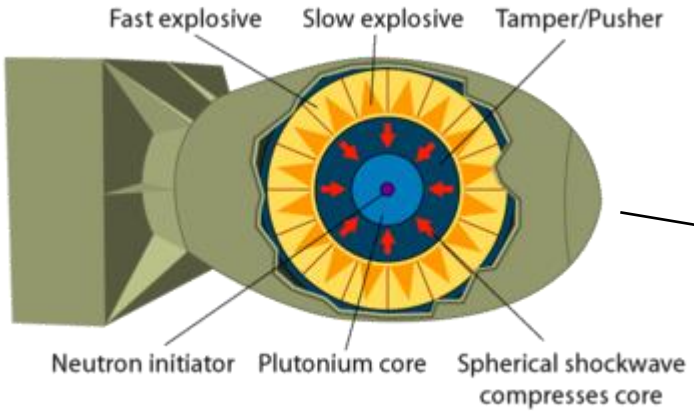


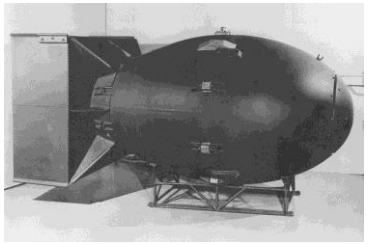


The mushroom cloud of the atomic bombing of Nagasaki, Japan, 1945, rose some 18 kilometers above the hypocenter

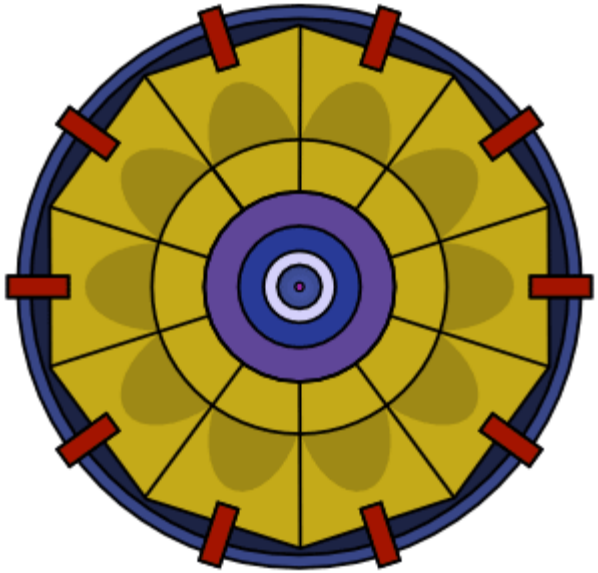
Хиросима после ядерного взрыва

Взрывная имплозия





Fat Man



Плутониевая бомба

Конструктивно бомба представляет собой несколько сфер, вложенных друг в друга:

1.Импульсный нейтронный инициатор (ИНИ, «ёжик», «урчин» (англ. *urchin*)) — шар диаметром порядка 2 см из бериллия, покрытый тонким слоем сплава иттрий-полоний или металлического полония-210 — первичный источник нейтронов для резкого снижения критической массы и ускорения начала реакции. Срабатывает в момент перевода боевого ядра в закритическое состояние (при сжатии происходит смешение полония и бериллия с выбросом большого количества нейтронов). В настоящее время короткоживущий полоний-210 заменён долгоживущим плутонием-238, также способным при смешении с бериллием к мощному нейтронному импульсу.

2.Плутоний. Желателен максимально чистый изотоп плутоний-239, хотя для увеличения стабильности физических свойств (плотности) и улучшения сжимаемости заряда плутоний легируется небольшим количеством галлия.

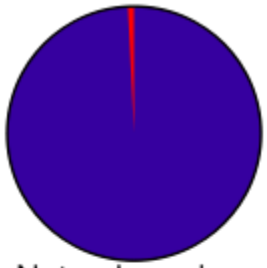
3.Оболочка (англ. *tamper*), служащая отражателем нейтронов (из урана).

4.Обжимающая оболочка (англ. *pusher*) из алюминия. Обеспечивает бóльшую равномерность обжима ударной волной, в то же время предохраняя внутренние части заряда от непосредственного контакта со взрывчаткой и раскалёнными продуктами её разложения.

5.Взрывчатое вещество со сложной системой подрыва, обеспечивающей синхронность подрыва всего взрывчатого вещества. Синхронность необходима для создания строго сферической сжимающей (направленной внутрь шара) ударной волны. Несферическая волна приводит к выбросу материала шара через неоднородность и невозможности создания критической массы. Создание подобной системы расположения взрывчатки и подрыва являлось в своё время одной из наиболее трудных задач. Используется комбинированная схема (система линз) из «быстрой» и «медленной» взрывчаток — боратола и ТАТВ.

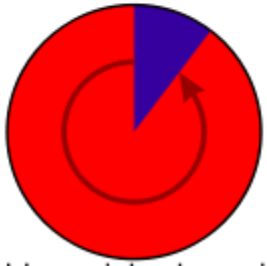
Для уменьшения риска, бомба «Толстяк» была скопирована в СССР под названием РДС-1.

Ядерное топливо



Natural uranium
> 99.2% U-238
0.72% U-235

Low-enriched uranium
(reactor grade)
3-4% U-235



Highly enriched uranium
(weapons grade)
90% U-235

Ядра, делящиеся нейтронами любых энергий, называют **ядерным горючим**.
Ядра, которые делятся только нейтронами с энергией выше некоторого порогового значения, называют **сырьевым материалом**, так как при захвате нейтрона пороговым ядром образуются ядра ядерного горючего.
Комбинация ядерного горючего и сырьевого материала называется ***ядерным топливом***.

Ядерное топливо делится на два вида:
•Природное урановое, содержащее делящиеся ядра ^{235}U, а также сырьё ^{238}U, способное при захвате нейтрона образовывать плутоний ^{239}Pu;
•Вторичное топливо, которое не встречается в природе, в том числе ^{239}Pu, получаемый из топлива первого вида, а также изотопы ^{233}U, образующиеся при захвате нейтронов ядрами тория ^{232}Th.

По химическому составу, ядерное топливо может быть:
•*Металлическим*, включая *сплавы*; *Оксидным* (например, UO_2); *Карбидным* (например, PuC_{1-x}); *Нитридным*; *Смешанным* (PuO_2 + UO_2).

А вот два миллиарда лет тому назад, к примеру, проблема запасов урана была бы совсем не столь острой. Природный уран содержал тогда от 3 до 4 % урана-235 -- такой концентрации достаточно для пуска атомного реактора без предварительного обогащения.

Природа даже позволила себе шутку: в то время действительно существовал такой самопроизвольный реактор.

В Окло, в республике Габон, на западном побережье Африки, где сейчас ведутся разработки мощных месторождений урана, два миллиарда лет тому назад протекала доисторическая цепная реакция и замедлителем служила природная вода.

Реактор в Окло работал, по меньшей мере, 150 000 лет.

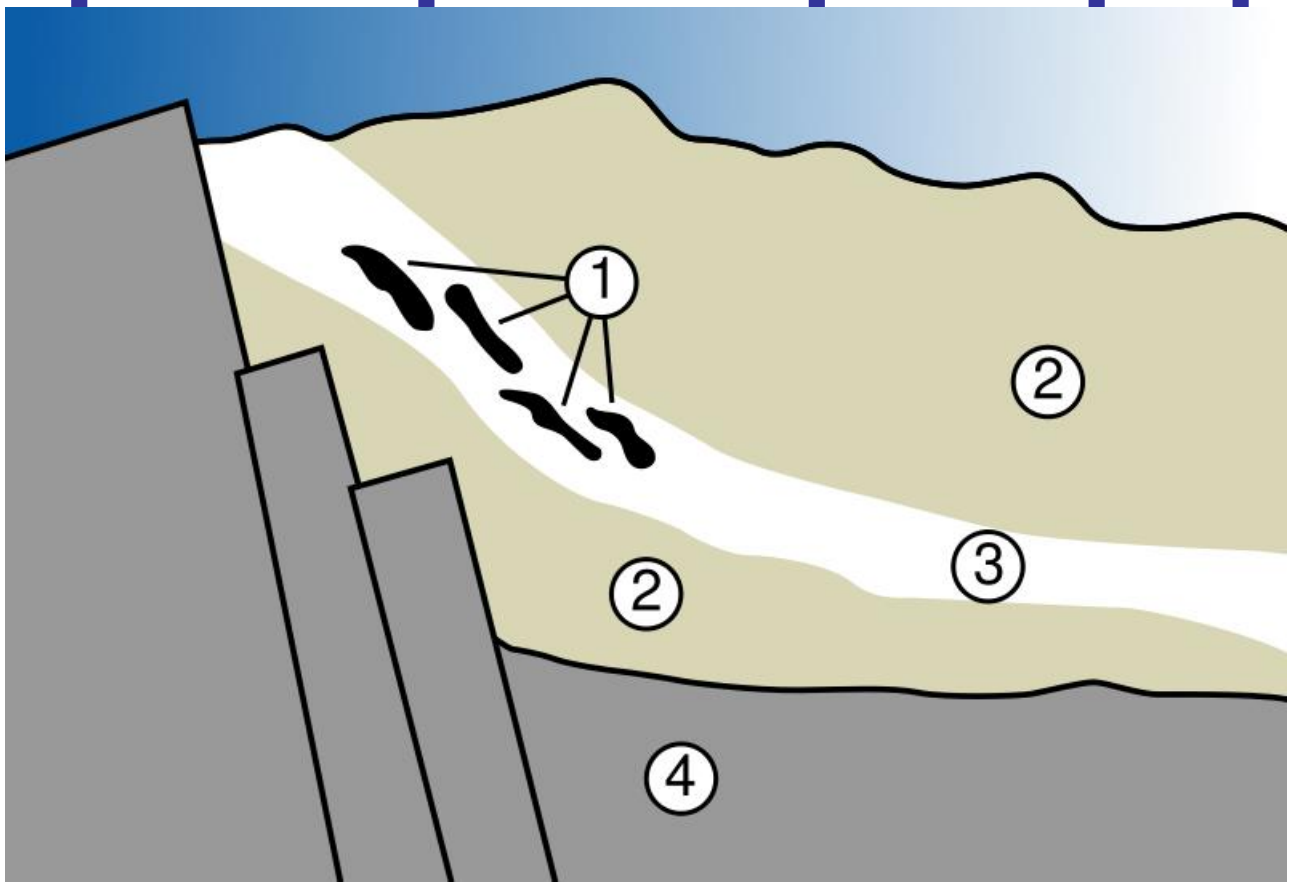
Oklo: Location

остатки окиси урана видны как желтоватые горные породы

Толчком для научного расследования по делу "Окло" был странный результат анализа: уран из Окло содержит 0,7171 % урана-235 вместо обычных 0,7202 %. Недостающие 0,0031 % следует приписать выгоранию урана в естественном реакторе.

К такому выводу пришли только после исключения множества других источников ошибок. Значит, природа уже два миллиарда лет тому назад совершала то, чем человечество так гордится сегодня, а именно -- запуском самоподдерживающейся атомной цепной реакции с ураном!

Ядерный реактор в природе



Геологические условия, сложившиеся 2 млрд. лет назад в районе Окло (Габон, Африка), способствовали реализации природного ядерного реактора:

1. Активные зоны реактора; 2. Песчаник;

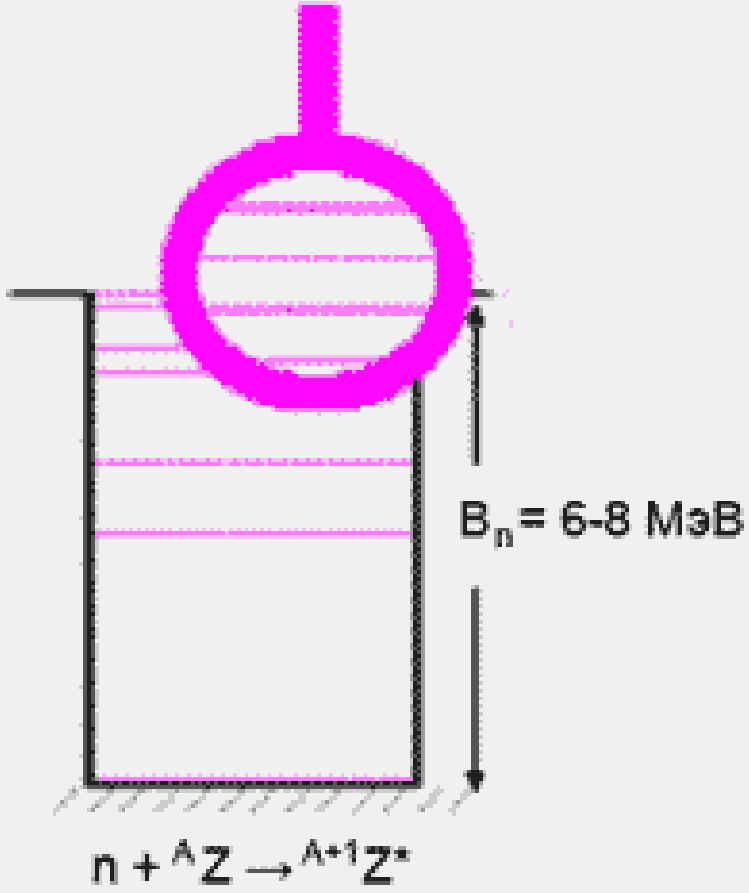
3. Урановая руда; 4. Гранит.

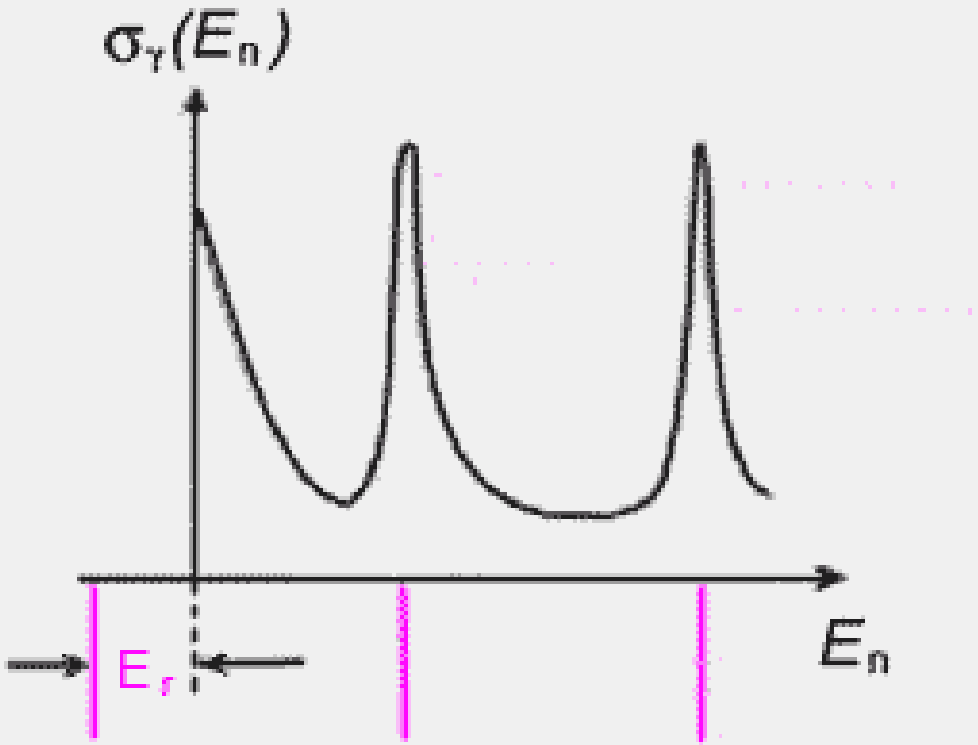
Высокая концентрация ^{235}U (~3%) на тот момент стимулировала цепную реакцию, а подземные воды послужили замедлителем нейтронов. Стабилизация мощности реактора: при разогреве вода выкипала, реакция тормозилась, а приток воды вновь её усиливал.

Как же природе удалось создать условия для цепной ядерной реакции? Сначала в дельте древней реки образовался богатый урановый рудой слой песчаника, который покоился на крепком базальтовом ложе. После очередного землетрясения обычного в то буйное время базальтовый фундамент будущего реактора опустился на несколько километров, потянув за собой урановую жилу. Жила растрескалась, в трещины проникла грунтовая вода. Затем очередной катаклизм поднял всю "установку" до современного уровня.

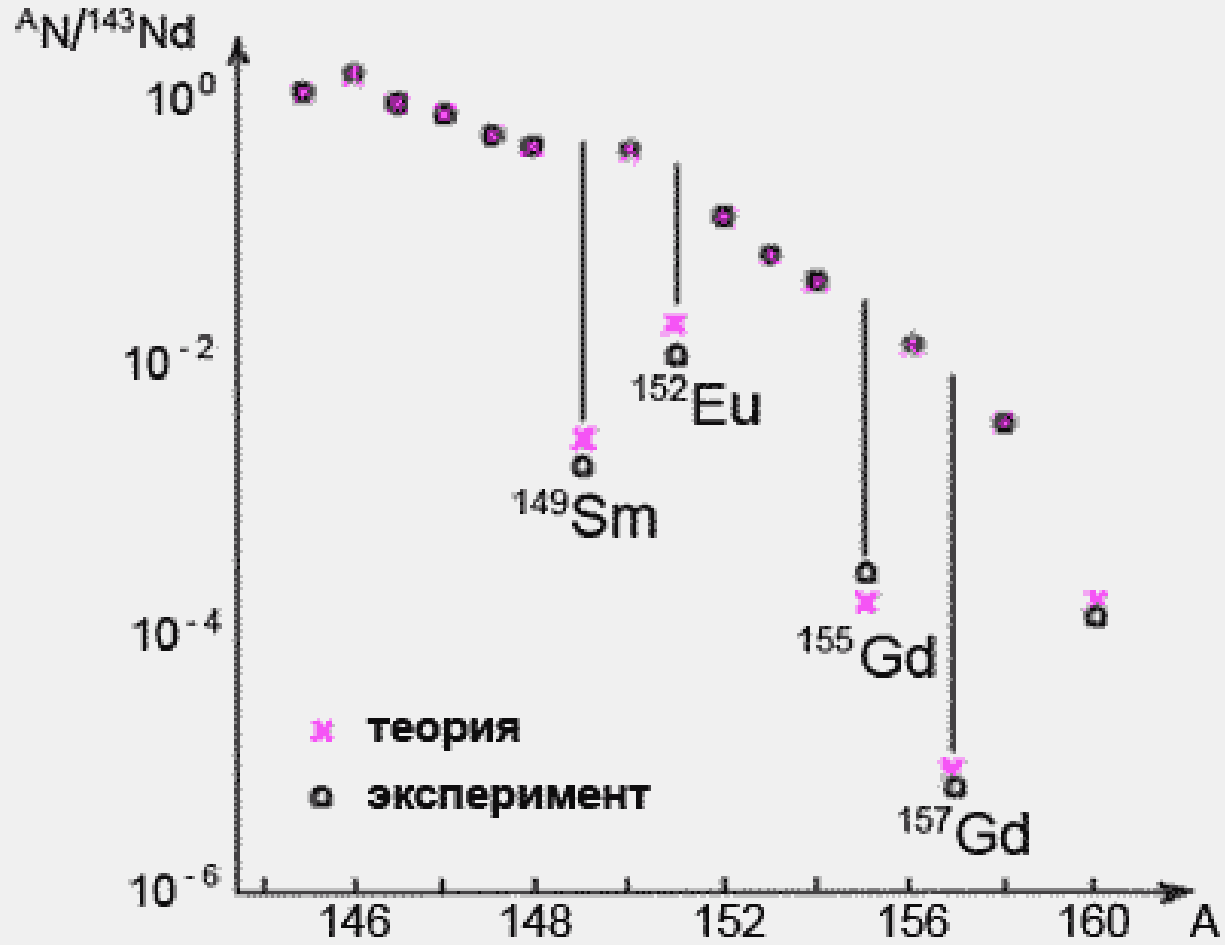
Постоянны ли константы?

Сильный поглотитель как чувствительный детектор изменения α.





Слева — плотность уровней составного ядра $^{A+1}Z^*$; ($^{149}_{62}Sm$)
справа — резонансы в сечении реакции $n + {}^{A}Z \rightarrow {}^{A+1}Z^*$.
Сечение захвата нейтрона ведёт себя как $\sigma_\gamma(E_r) \sim (\Gamma_\gamma / E_r)^2$,
где E_r — расстояние до резонанса, а Γ_γ — его ширина.
При сдвиге E_r захват нейтронов сильно меняется.



Сравнение расчётных и измеренных концентраций тяжёлых осколков деления ^{A}N относительно содержания ^{143}Nd для одной из проб реактора Окло

В области сильных поглотителей наблюдаются глубокие провалы.
Расчёт этих провалов для современных значений сечений поглощения прекрасно согласуется с экспериментальными измерениями.
Это означает, что все сильные поглотители были сильными и 2 млрд лет назад.
Если сечения и изменились, то менее чем на $\Gamma_\gamma/2$:
$\Delta E_r \leq \Gamma_\gamma/2 = 0{,}05$ эВ.
Отсюда следует ограничение на среднюю скорость изменения электромагнитной константы α:
$(d\delta\alpha/dt)/\alpha \leq 3\times10^{-17}$ год $^{-1}$.

Таблица 3. Ограничения на скорость изменения на основе данных о содержании $^{149}_{62}Sm$ в реакторе Окло (строки 1—5) и других результатов (6, 7)			
Организация	**Авторы, год**	**ΔE_r, δα/α, (dδα/dt)/α**	**Зона, спектр, T_C**
1. ЛИЯФ, Гатчина, СССР	**Ю. Петров, 1976 г. [7]**	**$\Delta E_r \le 0{,}05$ эВ $\delta\alpha/\alpha \le 5\times10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \le 2{,}5\times10^{-17}$ год$^{-1}$**	**RZ2, максвелловский, T_C = 300 К**
2. ЛИЯФ, Гатчина, СССР	**А. Шляхтер, 1976 г. [10]**	**$\Delta E_r \le 0{,}02$ эВ $\delta\alpha/\alpha \le 1\times10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \le 0{,}5\times10^{-17}$ год$^{-1}$**	**RZ2, максвелловский, T_C = 300 К**
3. Институт повышенных знаний, Принстон, США	**Т. Дамур и Ф. Дайсон, 1996 г. [13]**	**$\Delta E_r \le 0{,}09$ эВ $\delta\alpha/\alpha \le 9\times10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \le 5{,}0\times10^{-17}$ год$^{-1}$**	**RZ2, максвелловский, T_C = (450–1000) К**
4. Университет Токио, Япония	**Я. Фуджи и др., 2000 г. [14]**	**$\Delta E_r \le 0{,}02$ эВ $\delta\alpha/\alpha \le 2\times10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \le 1{,}0\times10^{-17}$ год$^{-1}$**	**RZ2, максвелловский, T_C = (470–670) К**
5. ПИЯФ, Гатчина, Россия	**Ю. Петров и др., 2002—2004 гг. [9]**	**$\Delta E_r \le 0{,}06$ эВ $\delta\alpha/\alpha \le 6\times10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \le 3{,}0\times10^{-17}$ год$^{-1}$**	**RZ2, реакторный спектр, T_C = (725±55) К**
Космофизические и лабораторные данные			**Метод**
6. IUCAA, Пьун, Индия	**Х. Чанд и др., 2004 г. [16]**	**$\delta\alpha/\alpha \le (-60\pm60)\times10^{-8}$ $(d\delta\alpha/dt)/\alpha \le 12\times10^{-17}$ год$^{-1}$**	**Космофизический метод мультидублетов**
7. Парижская обсерватория, Франция	**С. Бизе и др., 2004 г.**	**$(d\delta\alpha/dt)/\alpha \le (-5\pm53)\times10^{-17}$ год$^{-1}$**	**Метод атомных фонтанов**

Ксеноновое отравление (йодная яма)

$$^{135}_{53}\mathrm{I} \xrightarrow[6{,}6\ \text{ч}]{\beta^-} {}^{135}_{54}\mathrm{Xe} \xrightarrow[9{,}1\ \text{ч}]{\beta^-} {}^{135}_{55}\mathrm{Cs}$$

В процессе деления ядер урана, во время работы ядерного реактора, среди прочих продуктов деления образуется радиоактивный изотоп йода ^{135}I.

В результате β-распада с периодом полураспада 6,57 часа он превращается в изотоп ксенона ^{135}Xe. (его период полураспада 9,14 часа).

Поглощённые им нейтроны, очевидно, не могут участвовать в цепной реакции деления урана, поэтому, присутствие ^{135}Xe снижает запас реактивности реактора.

В реакторе, работающем на большой мощности, убыль ^{135}Xe определяется его радиоактивным распадом и «выгоранием» в результате захвата нейтронов.

При снижении мощности реактора происходит накопление ^{135}Xe в топливных элементах («ксеноновое отравление»), которое ведет к падению скорости цепной реакции.

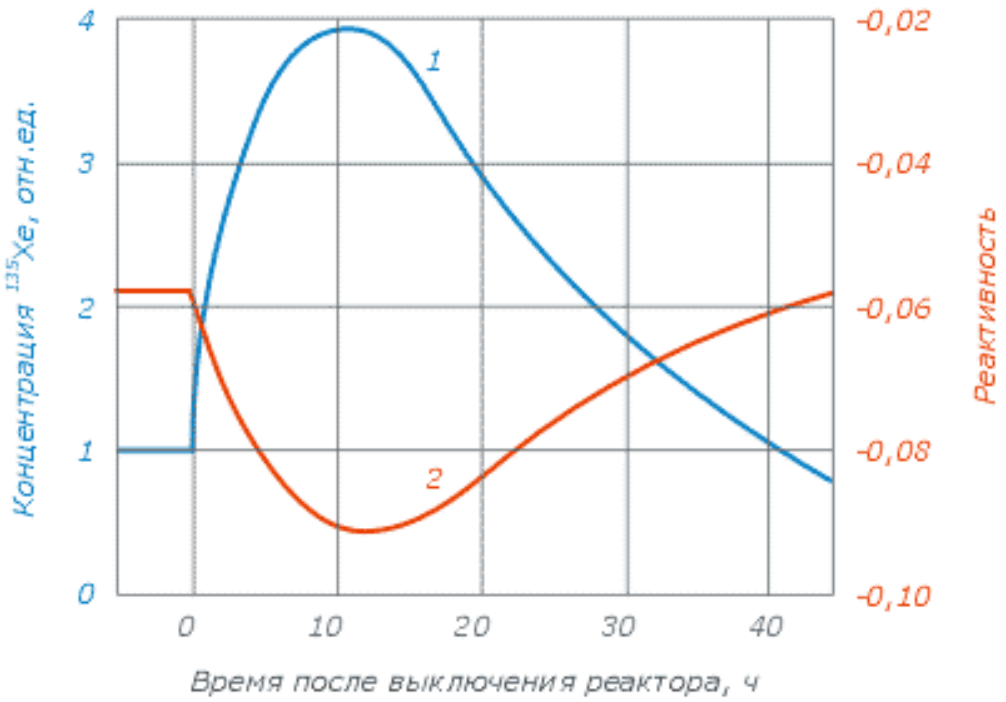


Рис. Зависимость концентрации ^{135}Xe (1) и реактивности (2) после выключения реактора. (До выключения реактора плотность потока нейтронов была $\varphi=10^{18}$ нейтр./(м²·с).)

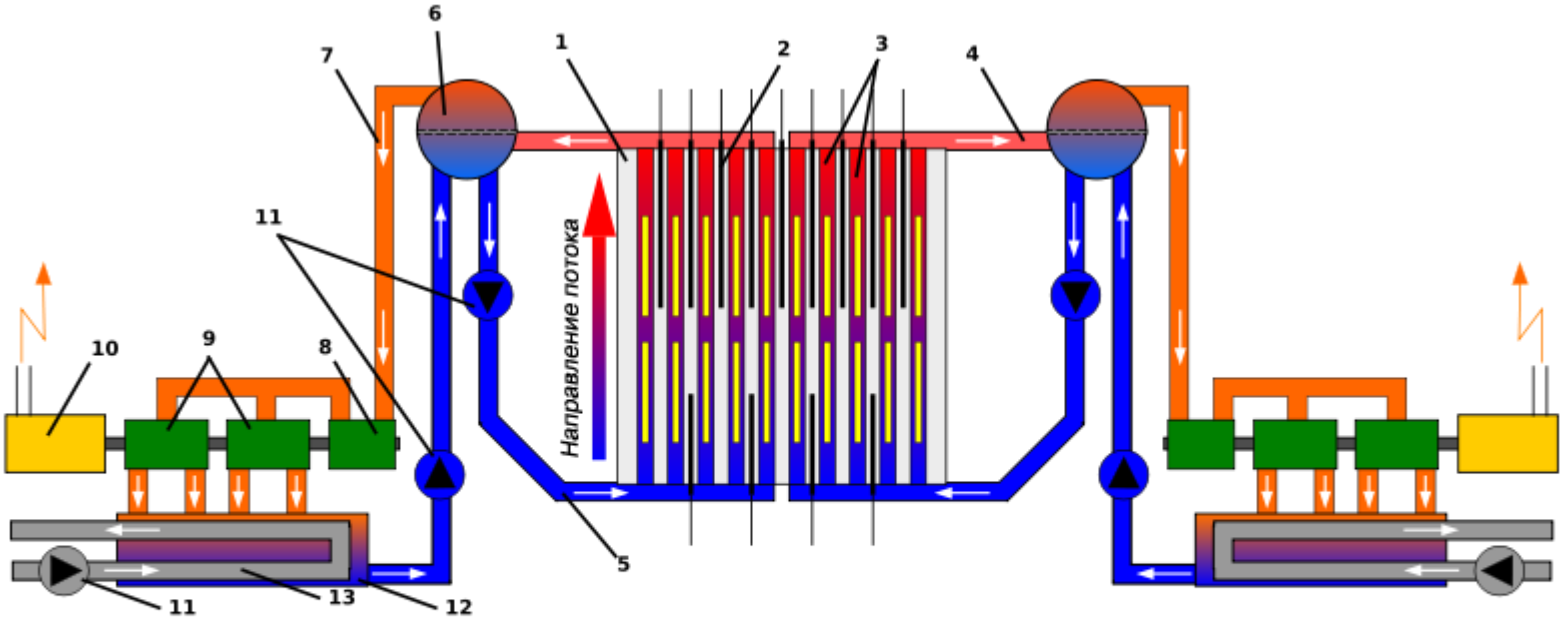
Чернобыльская авария

Ксеноновое отравление явилось одной из главных причин ***Чернобыльской катастрофы***.

Примерно в **1:24 26 апреля 1986** года на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС произошёл взрыв, который полностью разрушил реактор.

Схема энергоблока АЭС с реактором чернобыльского типа (РБМК)

РБМК (**Р**еактор **Б**ольшой **М**ощности **К**анальный) — двухцелевой канальный кипящий графито-водный ядерный реактор.



1 – Графитовый замедлитель
2 – Стержни управления и защиты
3 – Технологические каналы
4 – Пар
5 – Вода
6 – Барабан-сепаратор
7 – Сухой пар
8 – Турбина высокого давления
9 – Турбины низкого давления
10 – Электроический генератор
11 – Циркуляционные насосы
12 – Охладитель (конденсатор)
13 – Вспомогательный водяной контур

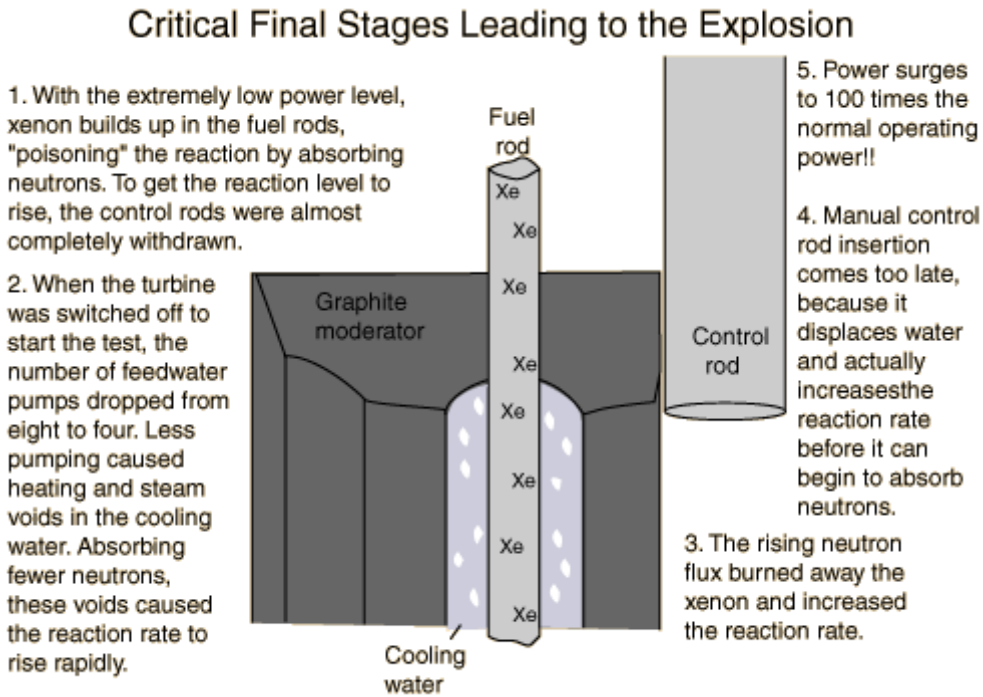
Хронология событий

(1) На 25 апреля 1986 года была запланирована остановка 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС для очередного обслуживания и проверки проектного режима, предусматривающего использование инерции турбины генератора (т.н. «выбега») для питания систем реактора в случае потери внешнего электропитания.

(2) Испытания должны были проводиться на мощности 700 МВт, но из-за оплошности оператора при снижении мощности, она упала до величины менее 30 МВт. Было решено не поднимать мощность до запланированных 700 МВт, а ограничиться 200 МВт. При быстром снижении мощности, и последующей работе на уровне 30 — 200 МВт стало усиливаться отравление активной зоны реактора изотопом ксенона-135 (см. «иодная яма»). Для того, чтобы поднять мощность, из активной зоны была извлечена часть регулирующих стержней.

(3) После достижения 200 МВт были включены дополнительные насосы, которые должны были служить нагрузкой для генераторов во время эксперимента. Величина потока воды через активную зону на некоторое время превысила допустимое значение. В это время для поддержания мощности операторам пришлось ещё сильнее поднять стержни. При этом, оперативный запас реактивности оказался ниже разрешённой величины, но персонал реактора об этом не знал.

Последние стадии

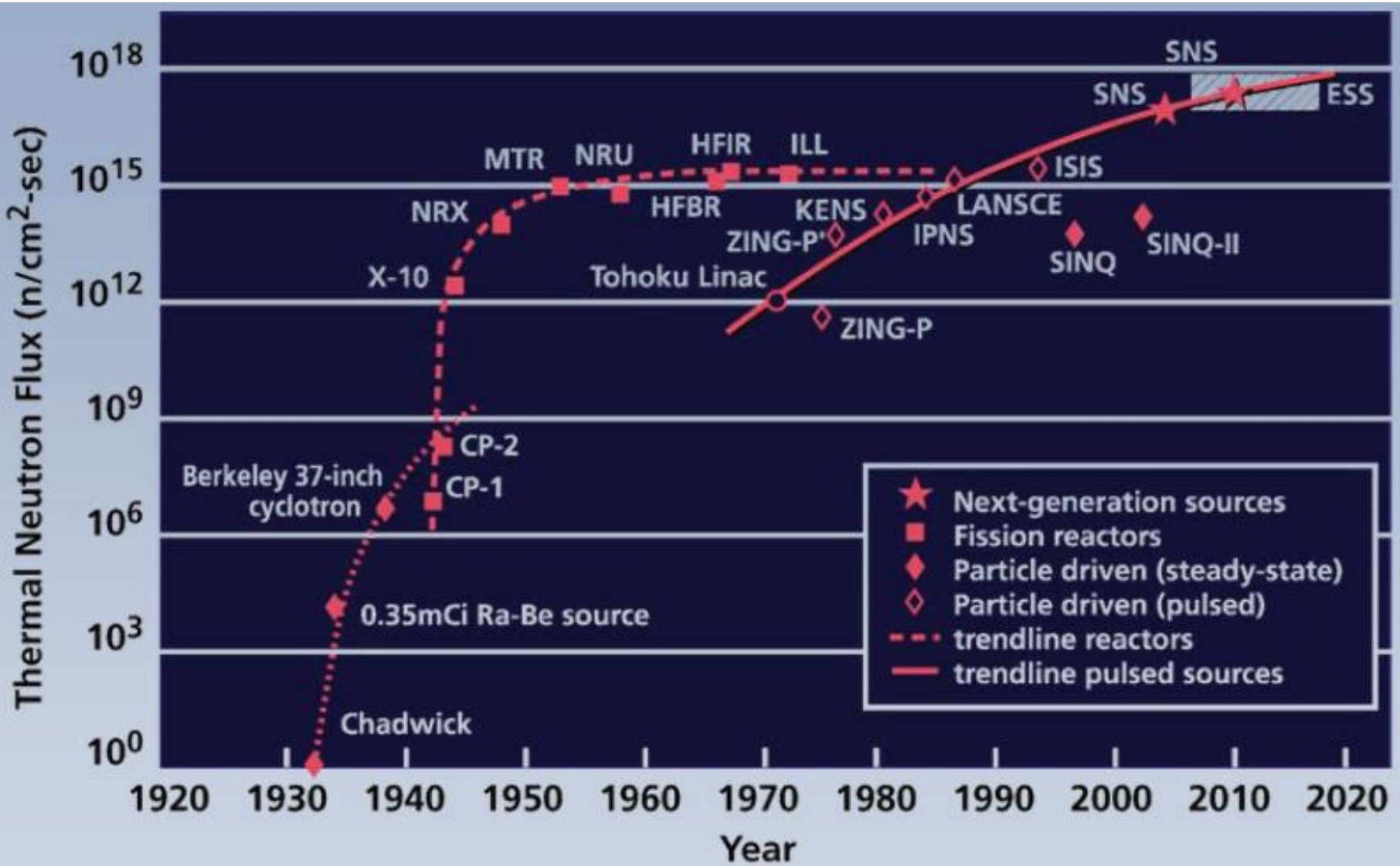


1-й взрыв был паровой;

2-й взрыв был либо химический, либо паровой, либо ядерный (?)

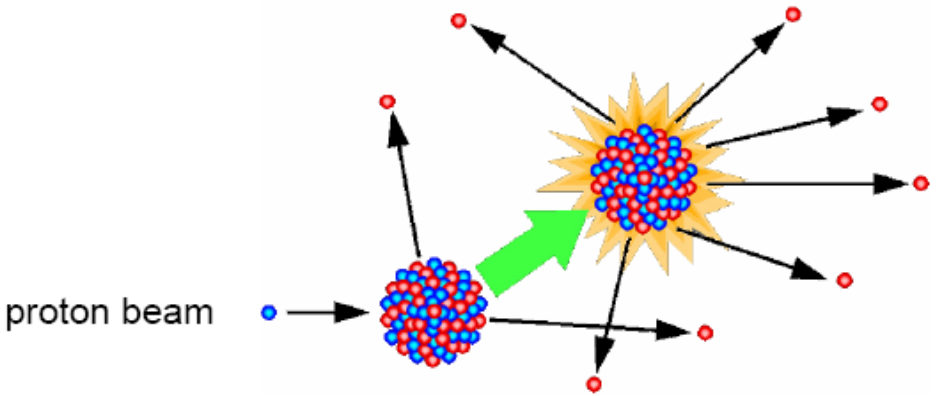
В 1:23:04 начался эксперимент. В этот момент никаких сигналов о неисправностях или о нестабильном состоянии реактора не было. Из-за снижения оборотов насосов, подключённых к «выбегающему» генератору и положительного парового коэффициента реактивности (из-за снижения теплопередачи) реактор испытывал тенденцию к увеличению мощности (вводилась положительная реактивность). В 1:23:40 оператор нажал кнопку аварийной защиты. Точная причина этого действия оператора неизвестна.

Development of neutron science facilities



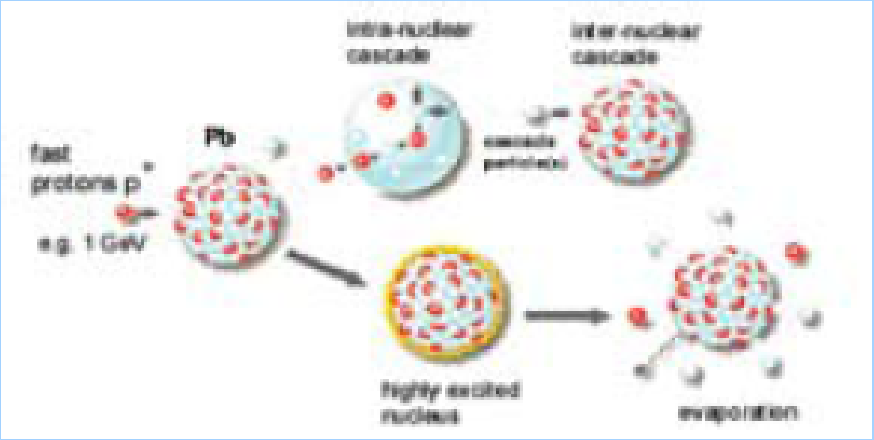
(Updated from *Neutron Scattering*, K. Skold and D. L. Price: eds., Academic Press, 1986)

Spallation



Spallation

- **no chain reaction**
- **pulsed operation**
- **30 neutrons/proton**



(Picture from reference [1])

- **Pulsed spallation source:**
  - **Advantages:**
    - **high peak flux**
    - **advantageous time structure for many applications**
    - **accelerator based – politics simpler than reactors**
    - **technology rapidly evolving**
  - **Disadvantages:**
    - **low time averaged flux**
    - **not all applications exploit time structure**

В *радиоизотопных (ампульных) источниках* используются нейтроны спонтанного деления (^{252}Cf) или реакции типа (α ,n) и (γ,n). Один миллиграмм ^{252}Cf испускает $2.28 \cdot 10^9$ нейтронов в секунду с энергией 1.5 МэВ.

Нейтронный источник, использующий реакции (α ,n), должен содержать альфа-источник и легкий изотоп (Li, Be, B) на котором происходит реакция (α ,n). Использование легких изотопов связано с тем, что энергия альфа-частиц должна быть больше высоты кулоновского барьера. В противном случае сечение реакции будет сильно подавлено. Например, в Po/Be источнике используется смесь металлического порошка бериллия с небольшим количеством альфа-излучателя – полония. Нейтроны образуются в реакции $^{9}Be(\alpha ,n)^{12}C$. В этом источнике получаются нейтроны, обладающие практически сплошным спектром энергий от 0 до 13 МэВ.

Источником нейтронов, основанным на фотоядерной реакции, является смесь радия и бериллия. В этом случае источник нейтронов представляет собой систему из двух запаянных ампул. Внутри ампулы с порошком бериллия помещается ампула с солями радия таким образом, что на бериллий действует только гамма-излучение, проходящее через стенки внутренней ампулы. Нейтроны образуются в реакции $^{9}Be(\gamma,n)^{8}Be$. Такой источник испускает монохроматические нейтроны с энергией 110 кэВ.

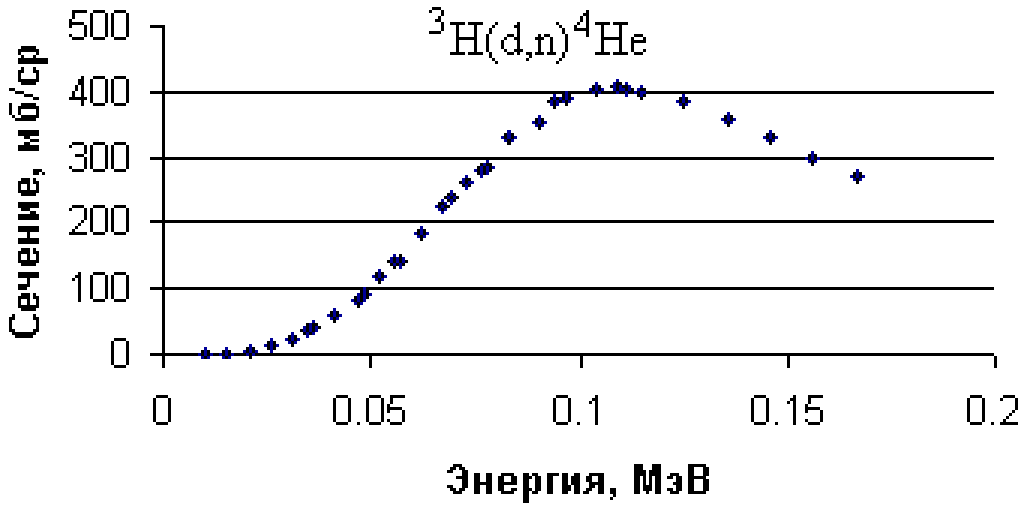
Интенсивность радиоизотопных источников 10^6-10^8 нейтронов/с, чувствительность (предел обнаружения) элементов ~10^{-4}-10^{-6}%.

Нейтронные генераторы это ускорители в которых нейтроны образуются в результате ядерных реакций на соответствующих мишенях. Чаще всего используются реакции

$$^{2}H(d,n)^{3}He,\ Q = 3.270\ МэВ; \quad (1)$$

$$^{3}H(d,n)^{4}He,\ Q = 17.590\ МэВ. \quad (2)$$

В результате этих реакций получаются нейтроны с энергиями ~2.5 МэВ и ~14.1 МэВ. Так как сечения этих реакций достаточно велики при небольших энергиях дейтронов, можно обойтись небольшими ускорителями. Максимум сечения реакции (2) при энергии $T_d \cong 120$ кэВ. Обычно используются каскадные генераторы. Типичный выход нейтронов у нейтронных генераторов ~10^{10} c^{-1}. Использование быстрых нейтронов позволяет проводить анализ легких элементов (C, N, O), которые плохо активируются тепловыми нейтронами.

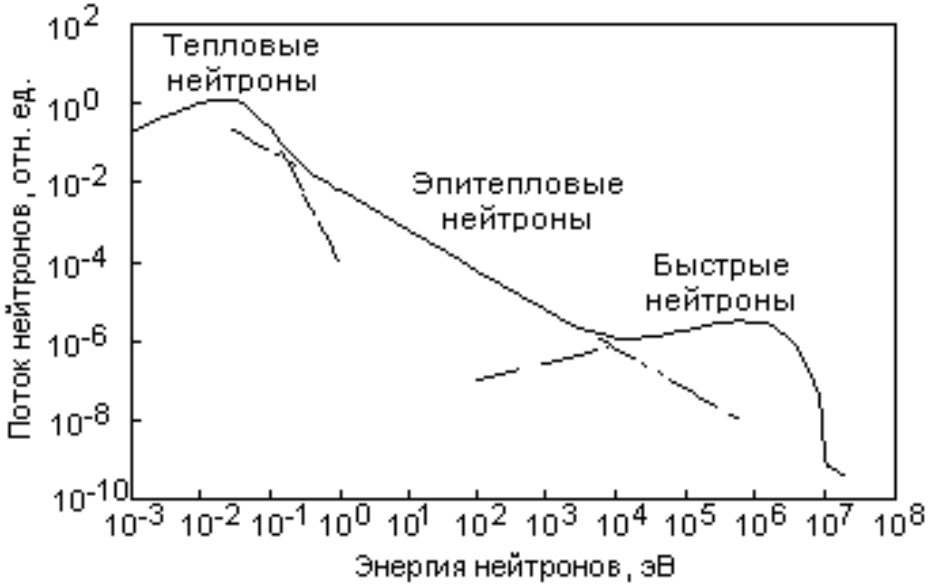


Ядерные реакторы **являются мощными источниками нейтронов. В спектре нейтронов выделяют 3 компоненты - тепловые, эпитепловые (резонансные) и быстрые нейтроны**

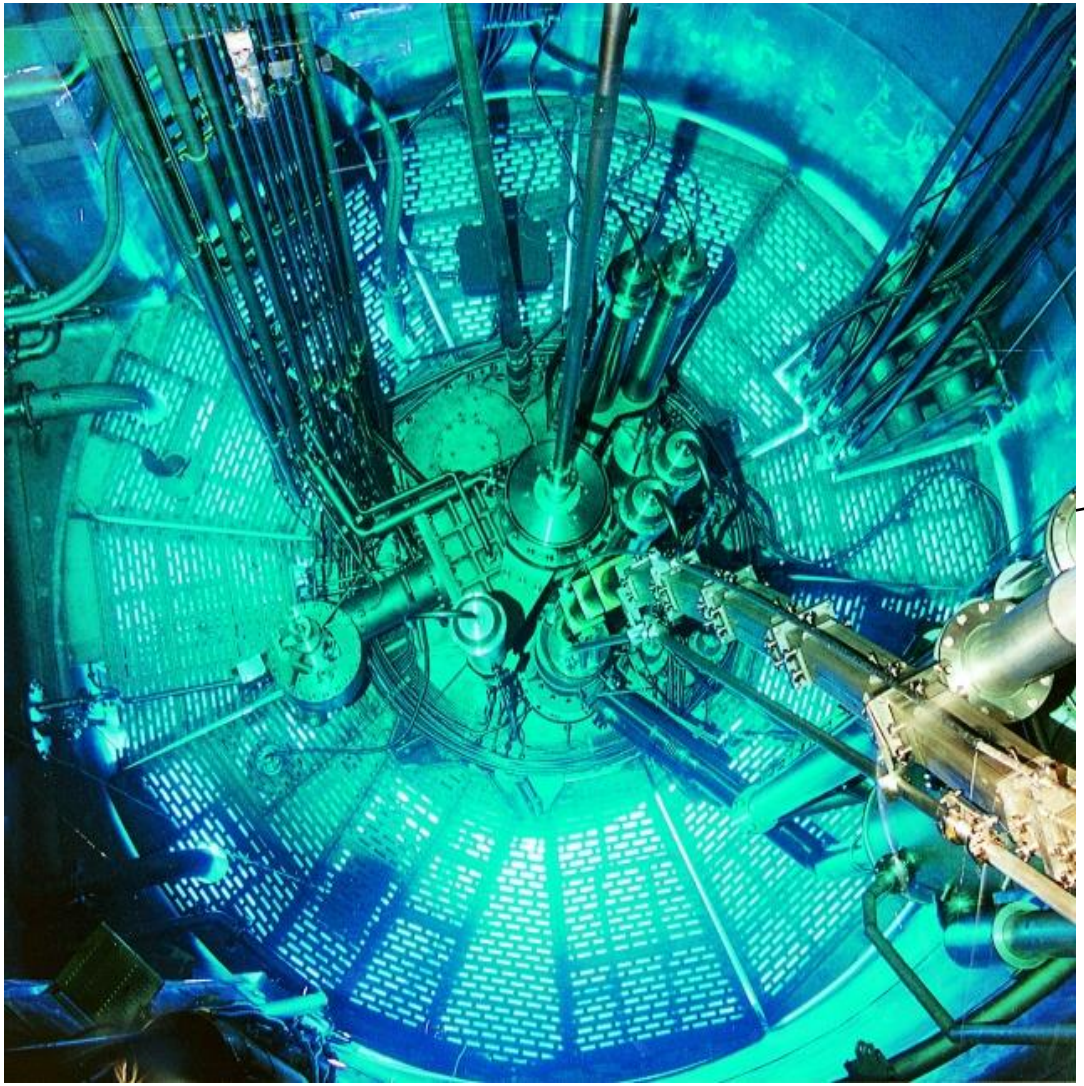
При облучении образцов как правило 90-95% нейтронного потока составляют тепловые нейтроны. Реактор мощностью 1 МВт обеспечивает нейтронный поток ~10^{13} (см$^{-2}$с$^{-1}$). Предел обнаружения большинства элементов при использовании таких потоков составляет 10^{-5}-10^{-10}%.

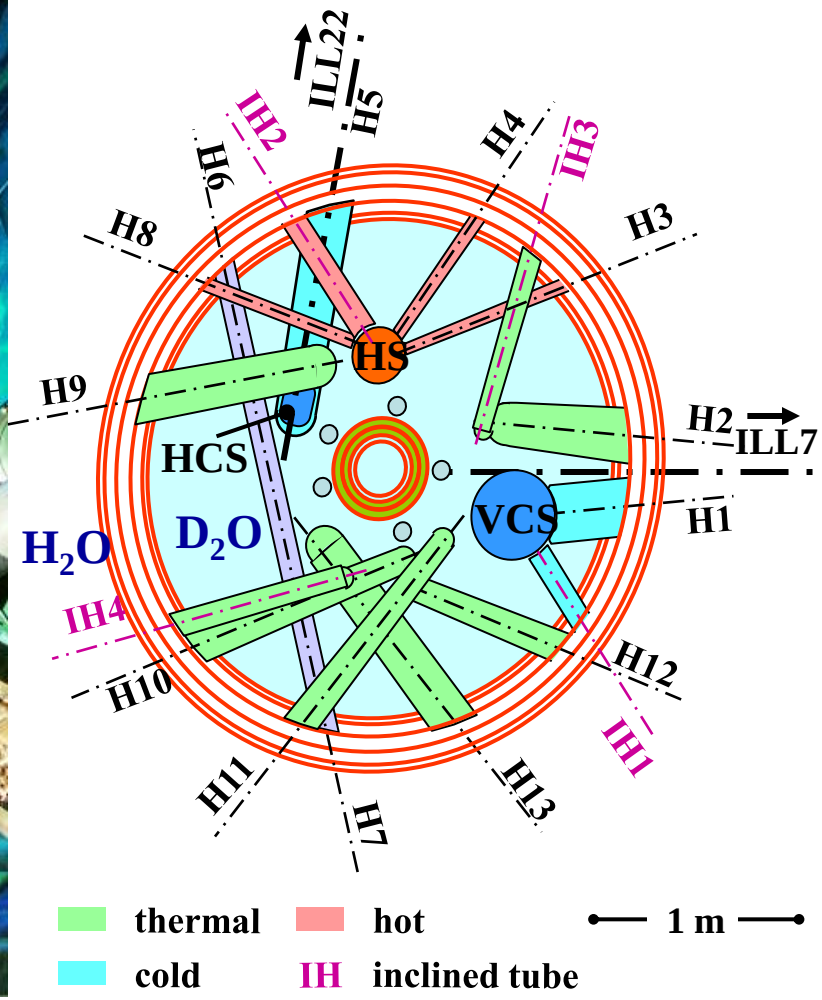
Эпитепловые нейтроны имеют энергии в диапазоне от 0.5 эВ до ~0.5 МэВ. Их доля в реакторе ~2%. Кадмиевая пластинка толщиной 1 мм поглощает все тепловые нейтроны, но пропускает эпитепловые и быстрые нейтроны. Как тепловые, так и эпитепловые нейтроны вызывают в мишени реакции (n,γ).

Доля быстрых нейтронов (> 0.5 МэВ) в реакторе составляет ~5%. Они вызывают реакции (n,p), (n,n') и (n,2n) и практически не вызывают реакции (n,γ).

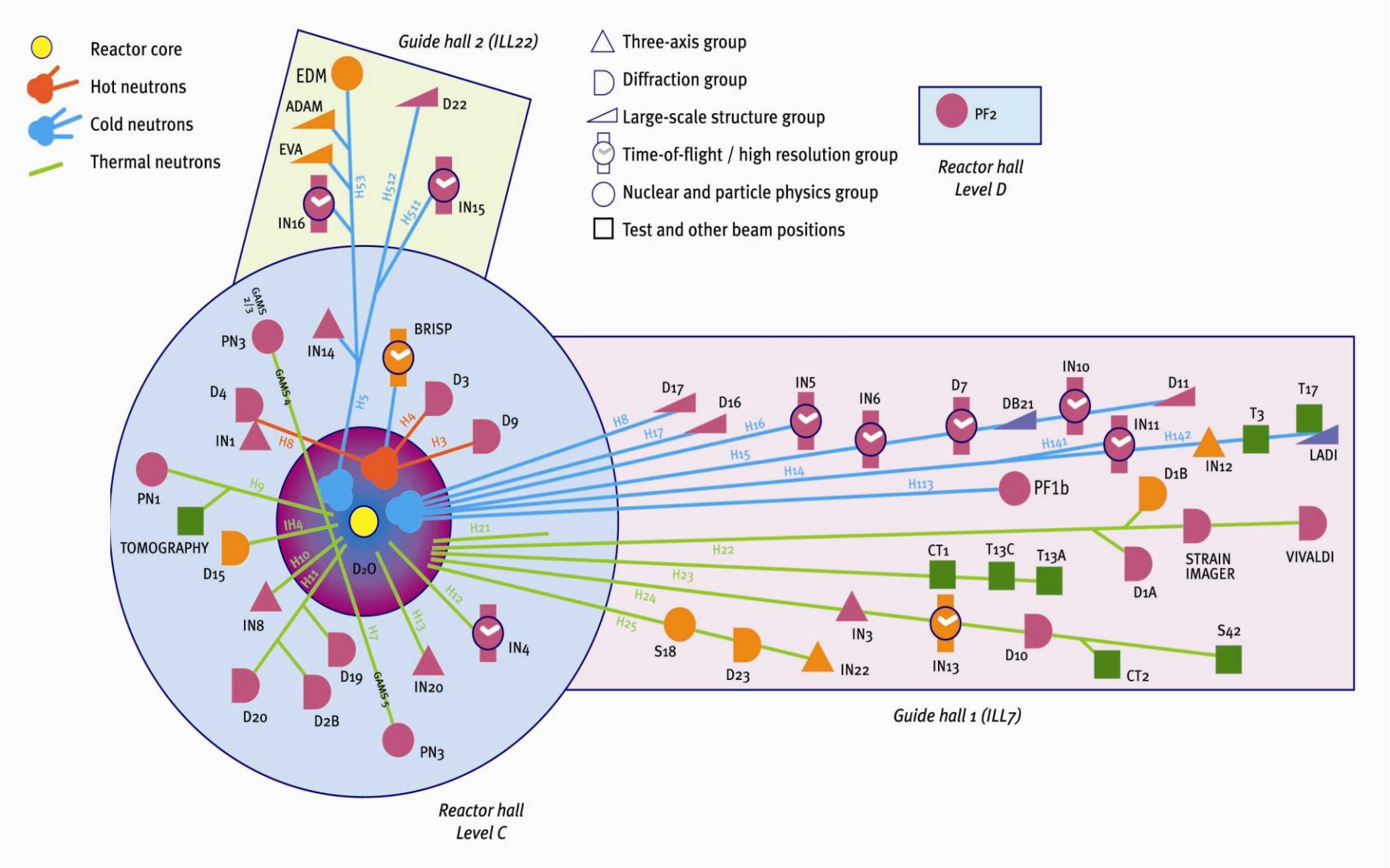
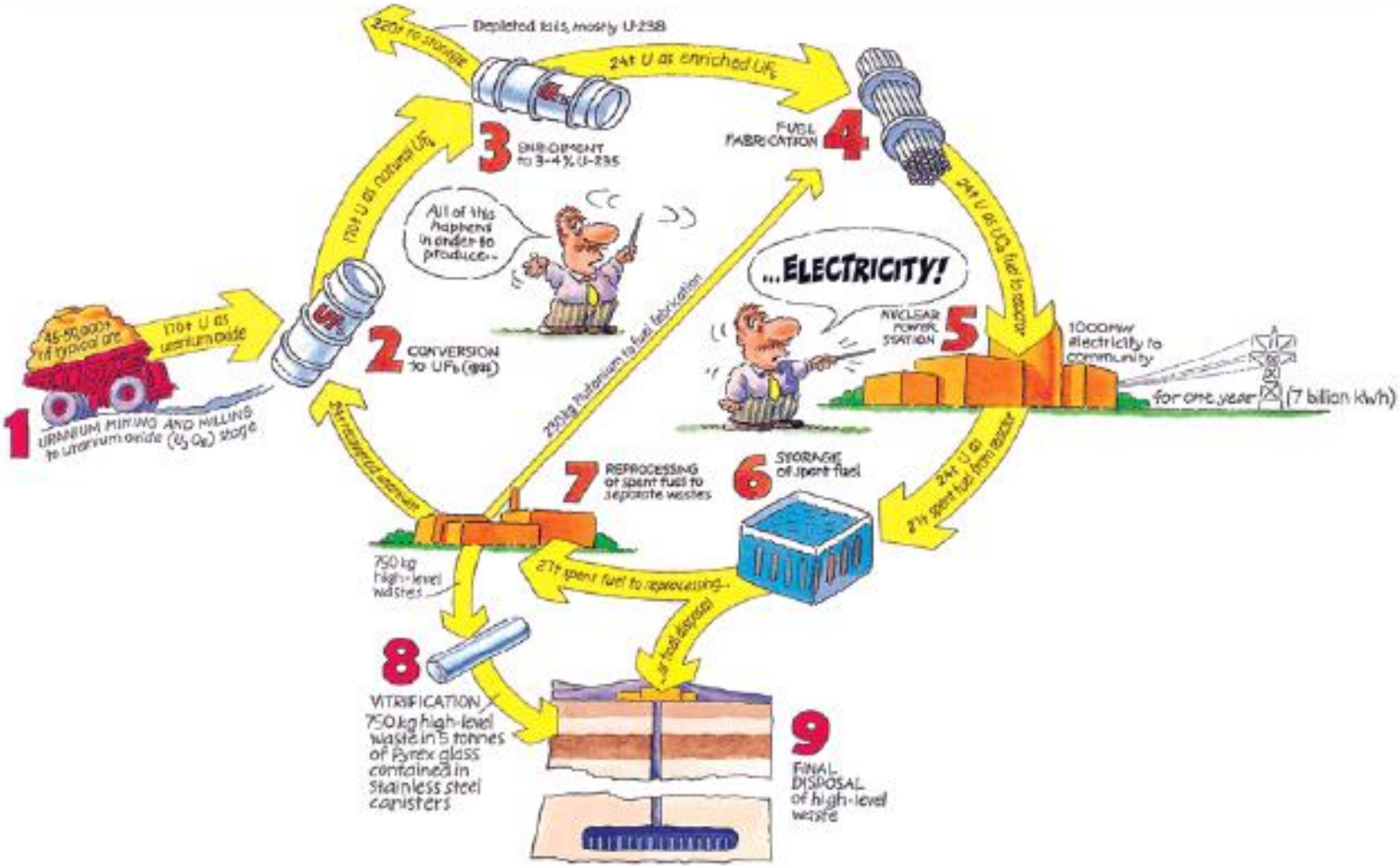


Inside the ILL Reactor





Institute Laue Langevin: A Neutron User Facility



Nuclear Fuel Cycle