

История и развитие физических представлений о строении окружающего мира

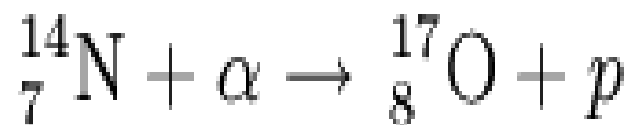
Часть VI. Нейтрон

Воронин Владимир Владимирович

ПИЯФ

Открытие нейтрона

Открытие нейтрона явилось следствием опытов по расщеплению легких ядер α -частицами, начатых Резерфордом в 1919 году.

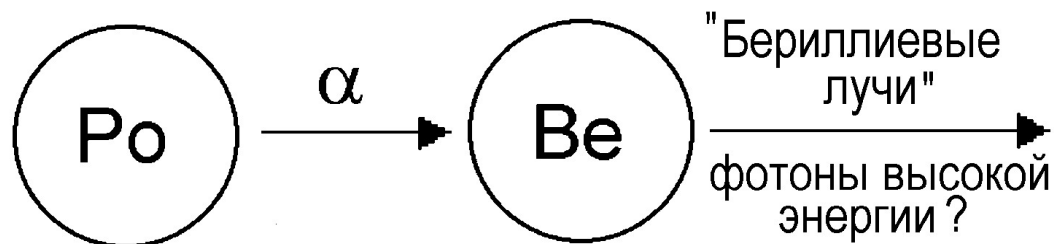


До 1931 года ускорителей, пригодных для ускорения частиц до энергий, достаточных для расщепления ядер, не существовало, поэтому реакция (α, p) , осуществляемая при помощи α -частиц, испускаемых естественными радиоактивными элементами, была единственной известной ядерной реакцией.

с 1921 по 1924 г. было установлено, что при бомбардировке α -частицами большинство легких элементов вплоть до калия (заряд ядра Z должен быть не очень велик, чтобы α -частица с энергией в несколько МэВ могла преодолеть кулоновское отталкивание), за исключением углерода и кислорода, испускают протоны. Кроме того, в этих реакциях постоянно возникает элемент, следующий по порядку в периодической системе. Все это вполне вписывалось в рамки представления о веществе, как о состоящем из протонов и электронов.

Бериллиевые лучи

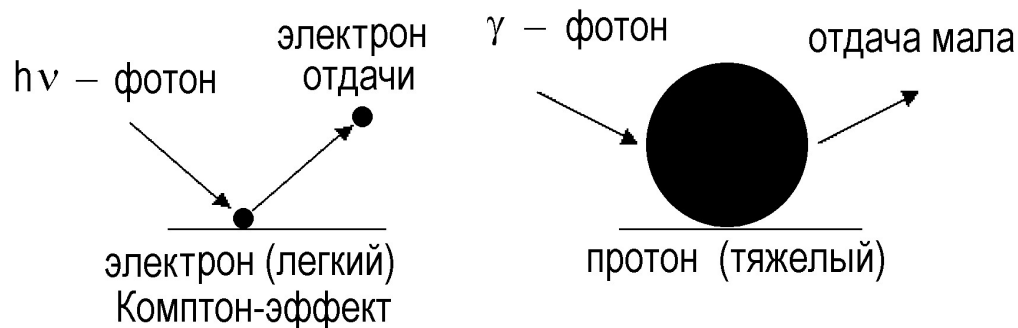
В 1930 году Вальтер Боте и Ханс Беккер обнаружили, что при бомбардировке ядер бериллия α -частицами вместо протонов возникает проникающее излучение, которое **очень слабо поглощается свинцом и воздействует на счетчик Гейгера–Мюллера**.



Они заявили, что новое излучение имеет проникающую способность, такую же, как **очень жесткие гамма-лучи**. Поэтому его приняли сначала за **жесткое γ -излучение**

Бериллиевые лучи выбивают протоны

В 1932 году Ирен Кюри и Фредерик Жолио показали, что бериллиевые лучи обладают удивительным свойством выбивать быстрые протоны из водородсодержащих веществ, таких как, например, парафин. Однако они объясняли это тем, что *"электромагнитное излучение очень высокой частоты способно освобождать в водородсодержащих веществах протоны и придавать им высокие скорости"*



Открытие нейтрона

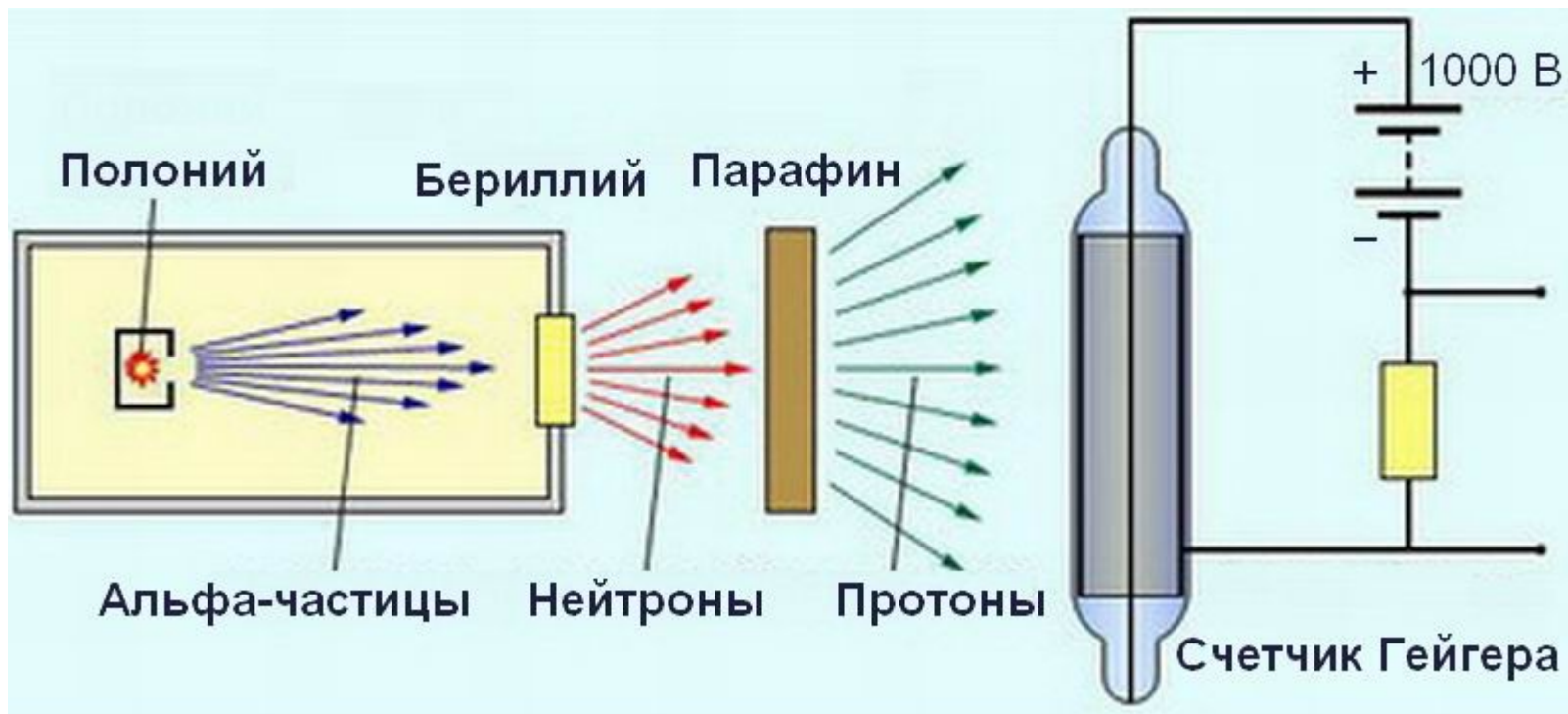
В 1932 году 17 февраля Джеймс Чэдвик направил в печать свою статью "**Возможное существование нейтрона**" (*Possible Existence of a Neutron. James Chadwick, Nature (Feb. 27, 1932) v. 129, p. 312*), которая открыла новую, ядерную, эру в истории развития человечества.

Через три года он был удостоен Нобелевской премии "...за открытие нового фундаментального кирпичика мироздания, из которых построены атомы и молекулы, а именно за открытие так называемого нейтрона. Интуиция, мысль и логика вместе с искусством эксперимента позволили профессору Чэдвику доказать существование нейтрона и установить его свойства..." (Из речи председателя Нобелевского комитета по физике Х.Плайджела (H.Pleijel) на церемонии вручения Нобелевской премии в 1935 г.).



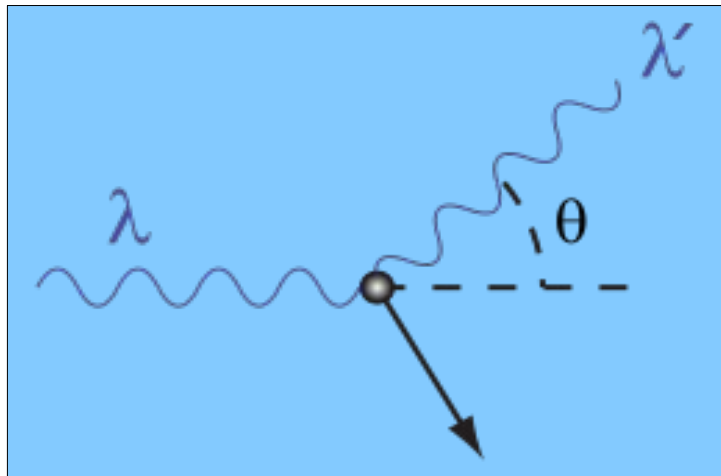
Сэр Джеймс Чедвик (англ. Sir James Chadwick). (20 октября 1891 – 24 июля 1974). Английский физик, известный за открытие нейтрона, член Лондонского королевского общества (1927), лауреат Нобелевской премии по физике за 1935 год. Ученик Э. Резерфорда. Окончил Манчестерский и Кембриджский университеты.

Эксперимент Чедвика



Кюри и Жолио при помощи ионизационной камеры установили, что бериллиевые лучи выбивают из парафина протоны, пробег в воздухе которых достигает **26 см**, что соответствует энергии в **4,3 МэВ**. Образование протонов было доказано непосредственно путем наблюдения их треков в камере Вильсона.

Энергия гамма-кванта



Формула Дебая – Комптона

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta),$$

при $\theta = 180^\circ$ энергия
отдачи максимальна

$$\hbar \omega \equiv E_\gamma = \sqrt{\frac{m c^2 E_{rec}}{2}}$$

$$E_{rec} = \frac{2 \hbar^2 \omega^2}{m c^2}$$

В нерелятивистском случае ($\omega < m c^2$, или $m c^2 / \omega \gg 1$)

$$E_{\gamma} = \sqrt{\frac{mc^2 E_{rec}}{2}}$$

Если сюда подставить измеренную $E_{rec} = 4,3 \text{ МэВ}$ и энергию покоя протона $mc^2 = 938 \text{ МэВ} \approx 1 \text{ ГэВ}$, то получается $\omega = 47 \text{ МэВ}$ (многовато будет), т. к. в ядре нет уровней с такими энергиями.

Кроме того, вероятность столкновения «в лоб» ($\theta = 180^\circ$) крайне мала, а протонов летит много.

Чэдвик также установил, что, кроме протонов, **бериллиевые лучи** способны выбивать и другие **легкие ядра Li, Be, B, C, N**. Энергии этих ядер можно было определить либо по длине пробега, либо по величине импульса в ионизационной камере. Оказалось, что **ядра отдачи азота**, например, имеют энергию **1,2 МэВ**. Для образования таких ядер за счет эффекта Комптона γ -кванты уже должны были бы иметь другую, еще большую, **энергию $\approx 70 \text{ МэВ}$** .

Масса нейтрона

Далее **Чэ́двик** предположил, что обнаруженное **Боте и Беккером** излучение состоит не из γ -квантов, а из частиц с **конечной массой покоя**. Эта гипотеза привела к прекрасному согласию со всей совокупностью результатов экспериментов и позволила определить эту массу.

Рассматривая лобовые соударения, для столкновения массивных частиц (нейтронов с массой m) с ядром (массы M)

$$V = \frac{2m}{M + m} v.$$

Масса нейтрона

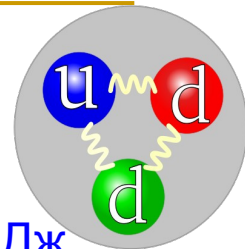
Для определения массы нейтрона нужно измерить максимальную энергию отдачи **двух различных ядер**,

$E_1 = M_1 V_1^2 / 2$, $E_2 = M_2 V_2^2 / 2$, и знать их массы M_1 , M_2 :

$$\text{Из } V = \frac{2m}{M + m} v. \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{V_1}{V_2} = \frac{M_1 + m}{M_2 + m} .}$$

Подставляя сюда полученные из опыта скорости ядер отдачи водорода и азота (**$3,3 \cdot 10^9$** и **$4,7 \cdot 10^8$** см/с, соответственно), Чэдвик получил **$m = 1,15$ атомных единиц массы (а.е.м.) с точностью 10%.**

Заряд нейтрона



Наблюдая прохождение нейтронов в газе камеры Вильсона, **П. Дж. Ди** в **1932 г.** установил, что нейтрон создает не более одной пары ионов на пути в 3 м, что соответствует **заряду по крайней мере в 1000 раз меньшему**, чем у протона. **Поэтому предположили, что заряд нейтрона e_n равен нулю.** Открытие нейтральной частицы с самого начала воспринималось физиками как событие первостепенной важности, поскольку разрушало представление о том, что заряд является неотъемлемым свойством вещества (протон, электрон).

В настоящее время интерес к наличию электрического заряда у нейтрона связан с такими фундаментальными проблемами физики, как, например, существование замкнутых суперструн – протяженных, бесструктурных 10- или 26-мерных объектов. Из них может быть построен окружающий мир, в котором известные нам "элементарные" частицы в принципе перестают быть элементарными и точечными.

В 1989 г. была достигнута следующая точность прямого измерения заряда нейтрона:

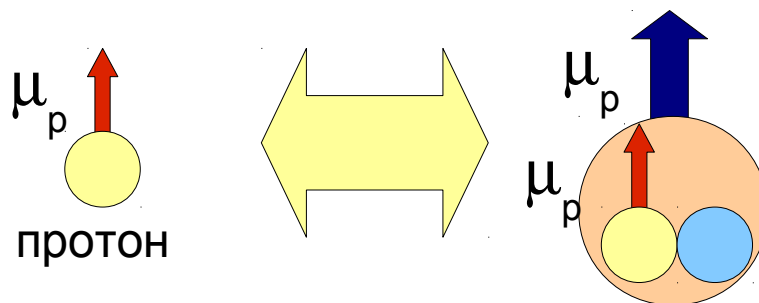
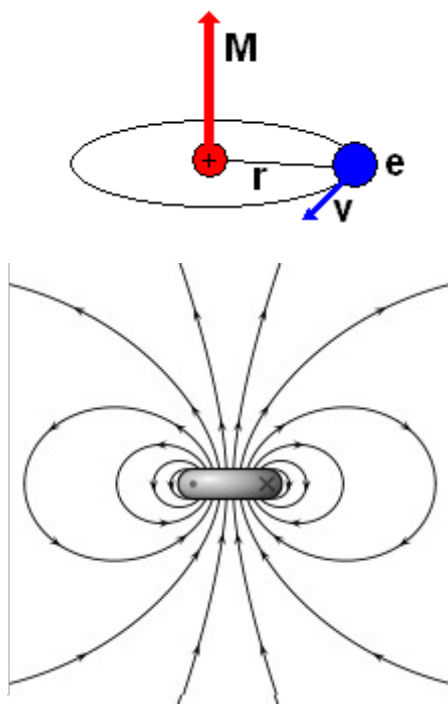
$$e_n = (-0,4 \pm 1,1) \cdot 10^{-21} e,$$

которая до сих пор еще не превзойдена.

Магнитный момент нейтрона

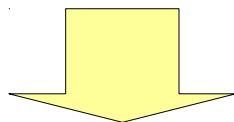
Ожидалось, что нейтральная частица **не может обладать магнитным моментом** (или вообще какими-либо электрическими свойствами, тем более, если она элементарна, т.е. бесструктурна)

Однако гипотеза о наличии у нейтрона магнитного момента возникла в **1934 году**, когда развитая О. Штерном с сотрудниками техника измерения магнитных моментов молекул за счет отклонения молекулярного пучка в неоднородном магнитном поле (**опыты Штерна – Герлаха**) позволила измерить магнитные **моменты протона и дейтона**.
Оказалось, что они существенно различны.



Величины магнитных моментов

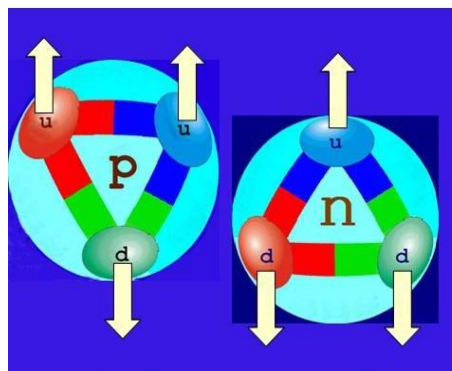
Из теории Дирака (протон и нейтрон не имеют структуры)



$\mu_p =$ ядерному магнетону

$\mu_n =$ нулю

ВЫВОД — нейтрон и протон имеют внутреннюю структуру



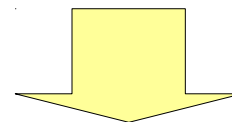
$e_p = 1,$

$e_n = 0$

$$\frac{\mu_n}{\mu_p} = -\frac{2}{3} = -0,67$$

$$\left[\frac{\mu_n}{\mu_p} \right]_{exp} = -0,68$$

Эксперимент



$\mu_p = 2.8$ ядерных магнетонов

$\mu_n = -1.9$ ядерных магнетонов

Магнитный момент нейтрона был впервые измерен в опытах Альвареца и Блоха в 1940г.

$$e_u = 2/3e, \quad e_d = -1/3e$$

Распад и время жизни нейтрона

В 1934 г. Чэдвик и Гольдхабер открыли фоторасщепление дейтона (ядра атома дейтерия, состоящего из протона и нейтрона) и существенно уточнили величину массы нейтрона. Она оказалась **больше суммы масс протона и электрона**, что окончательно разрушило представление о нейтроне как о некотором компактном связанном состоянии протона и электрона.

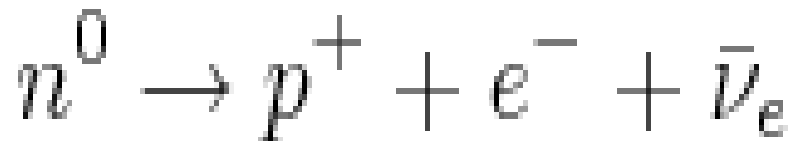
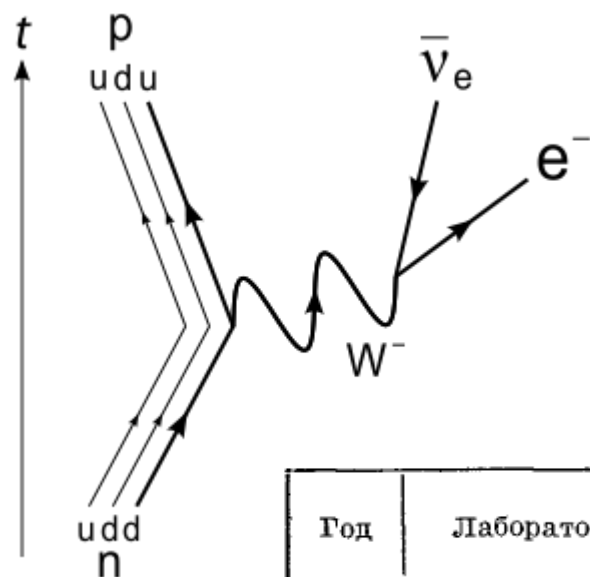
На основе этого превышения Фредериком Жолио-Кюри в 1934 было высказано предположение о **радиоактивности нейтрона**, которая была открыта лишь в 1948–1950 независимо А. Снеллом и Л. Миллером (Окридж, США), Дж. Робсоном (Чок-Ривер, Канада) и П.Е. Спиваком (Институт атомной энергии, Москва, СССР).

П.Е. Спиваку и его сотрудникам удалось еще в 1949 г. впервые наблюдать само **явление распада нейтрона**, и лишь условия секретности, в которых велись тогда все работы по ядерной физике, привели к тому, что опубликованы эти результаты были лишь на конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве в 1955 г., и потому приоритет открытия этого фундаментального процесса приписывают обычно **Снеллу и Робсону**.



СПИВАК Петр
Ефимович
(24.III.1911 – 30.III.1991)

Распад нейтрона



Современное наиболее точное значение

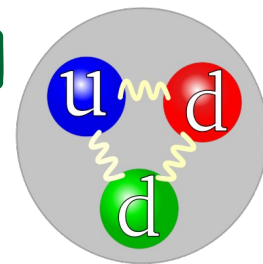
$$\tau_n = 878,5 \pm 0,8 \text{ с,}$$

(Серебров А.П., ПИЯФ, Гатчина)

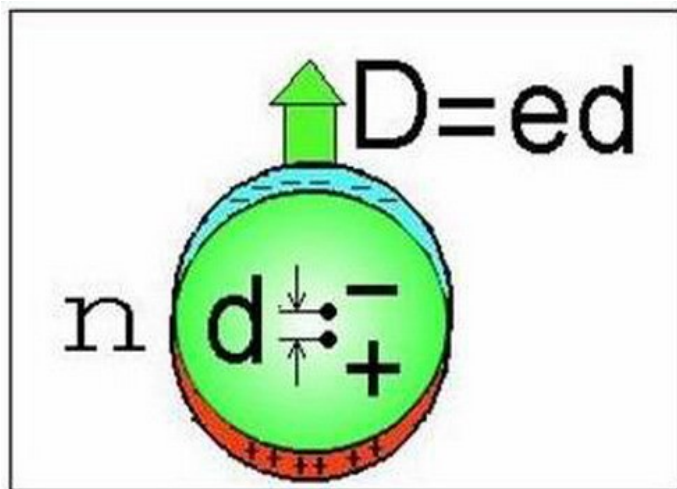
Год	Лаборатория	$T_{1/2}$, мин	Литература	Год	Лаборатория	$T_{1/2}$, мин	Литература
1948	Окридж (США)	15—30	4	1951	Чок-Ривер	$12,8 \pm 2,5$	9
1950	Чок-Ривер (Канада)	9—18	5	1955	ИАЭ (СССР)	$12,0 \pm 1,5$	8
1950	Окридж	10—30	6	1958	Там же	$11,7 \pm 0,3$	11
1950	Чок-Ривер	9—25	7	1959	Аргонн (США)	$12,7 \pm 1,9$	10
1950	ИАЭ (СССР)	8—15	8	1967	Ризо (Дания)	$10,78 \pm 0,16$	12
				1970	Там же	$10,61 \pm 0,16$	13

Распадается только свободный нейтрон. В атомном ядре он живет вечно.

Электрический дипольный момент нейтрона



Поиск **электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона**, является **одной из самых важных задач** современной физики.



Более подробно — на следующей лекции

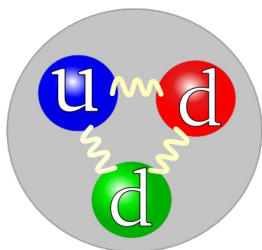
Проблема существования **ЭДМ нейтрона** тесно связана с фундаментальными проблемами нарушения **симметрии** нашего **Мира относительно операции обращения времени (T)**, а также **CP-симметрии** (инвариантности относительно зеркального отражения с одновременной заменой частиц на античастицы). Природа нарушения CP-инвариантности, обнаруженной в 1964 г. в распадах нейтральных K-мезонов, остается загадкой в течение уже 45 лет.

Современная точность (ПТЯФ, ILL)

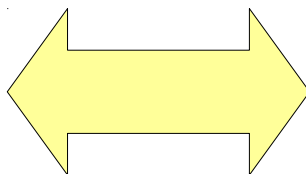
Одна из самых высоких точностей на физическую величину

$$d_n \leq 3 \cdot 10^{-26} \text{ ехсм}$$

нейтрон



Земля



Если представить нейтрон размером с Землю, состоящим из двух противоположно заряженных шаров, центры которых сдвинуты на малую величину d , то в результате это будет нейтральный шар с небольшими наплывами отрицательного и положительного зарядов на полюсах.

Толщина эти наплывов $\sim$ **2 мкм (при радиусе Земли 6400 км)!**

Новая - ядерная эпоха

- **1932** - открытие нейтрона (Дж. Чедвик)
- **1938** - деление ядер нейтронами (Отто Хан и Фриц Штрассман, Лиза Мейтнер и Отто Фриш)
- **1942** - первый ядерный реактор (Э. Ферми, США)
- **1945** - первый ядерный взрыв (США) (СССР - 29 августа **1949**г., плутониевая бомба)
- **1946** г. 25 декабря – заработал созданный И.В. Курчатовым и его сотрудниками первый физический уран-графитовый реактор Ф-1
- **1949** – первый в СССР (и Европе) тяжеловодный исследовательский ядерный реактор (А.И.Алиханов)

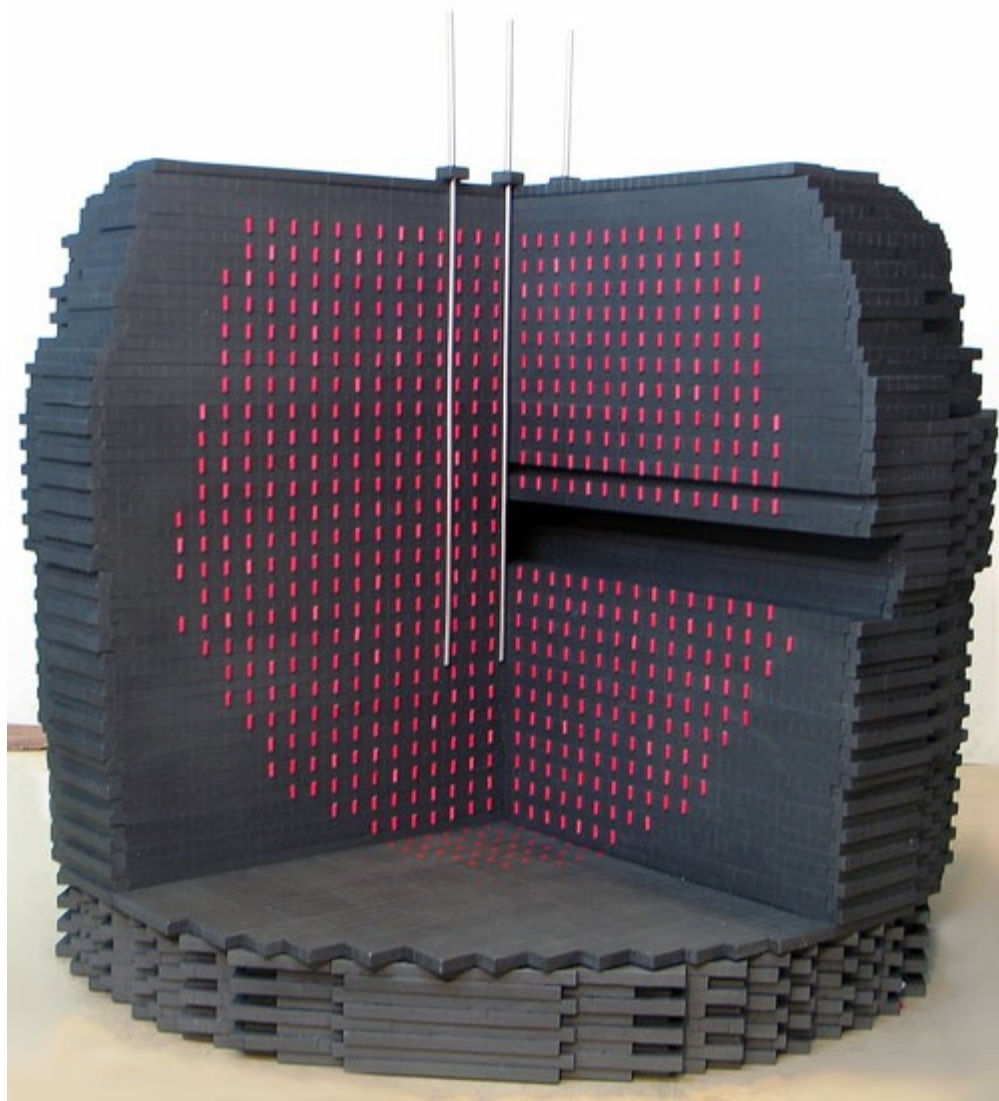
Ядерная эпоха

- **1952** - первый термоядерный взрыв (США) (СССР - **1953 г., 12 августа**, первая в мире транспортабельная водородная бомба)
- **1954** - первая атомная электростанция (Д.И.Блохинцев, И.В.Курчатов, Н.А.Доллежалъ, С.М.Фейнберг, СССР),
- **1958** – первая советская АПЛ "Ленинский комсомол", (И.В.Курчатов, А.П. Александров, Н.А. Доллежалъ) (USS Nautilus (SSN-571) – первая в мире атомная подводная лодка, спущена на воду в США в **1954** году).
- **1959** - первый атомный ледокол (В.И.Неганов, И.И.Африканов, 3 декабря сдан Минморфлоту СССР)

Реактор Φ -1

Кучатовский институт,
Москва. **(1946 год)**

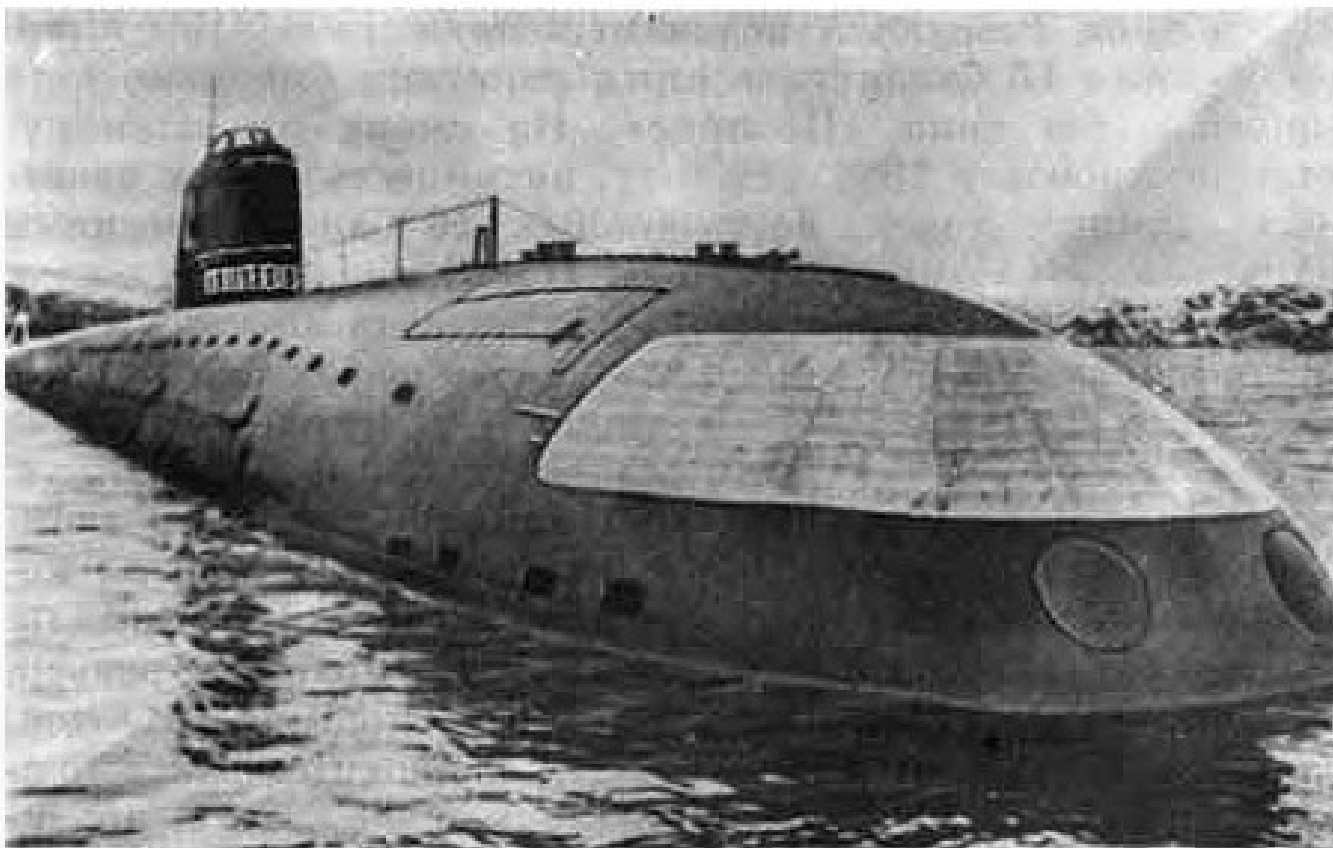
Всего для реактора
понадобилось около
500 тонн особо чистого
графита и **50 тонн** урана.
До сих пор является
действующим, используется
для метрологических целей.



Первая в мире атомная подводная лодка «Наутилус (SSN-571)», США



Первая советская атомная подводная лодка «Ленинский комсомол»



Пульт управления первой в мире АЭС



Первый атомный ледокол «Ленин»



Реактор ВВР-М (ТТИЯФ, Гатчина)

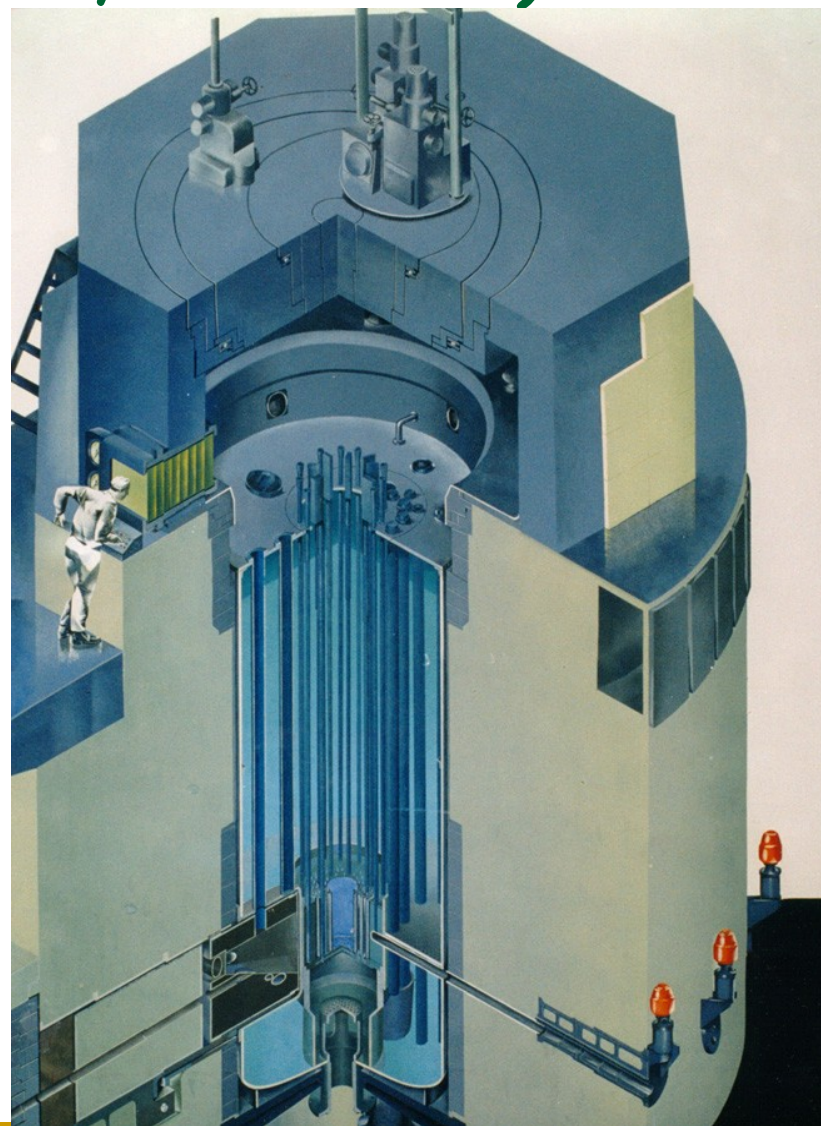
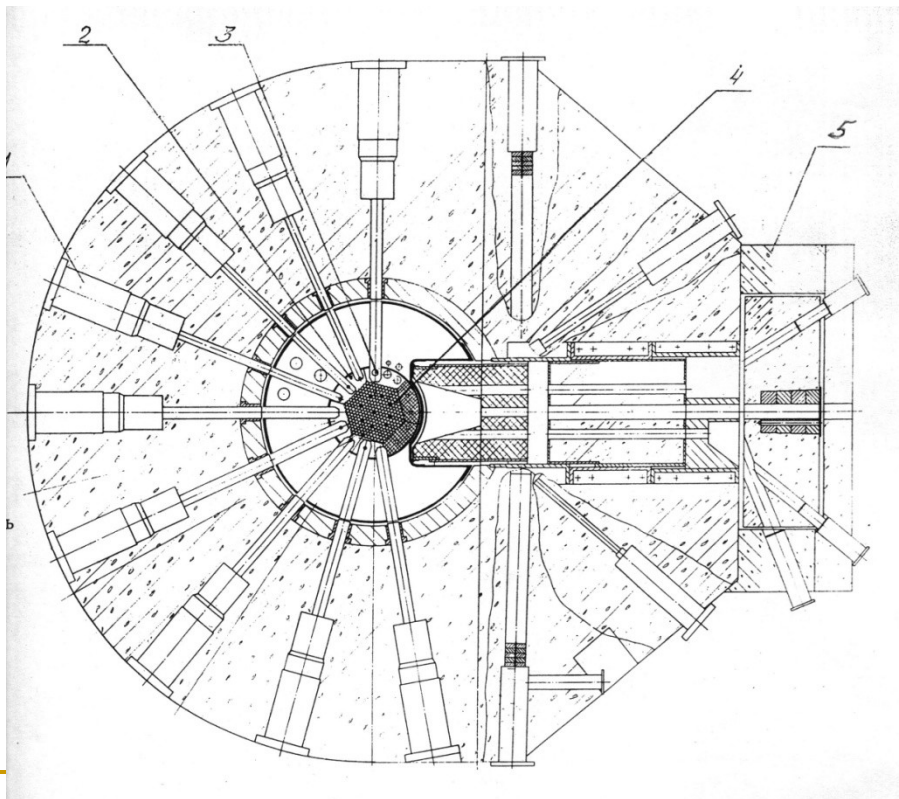
Запущен - **29 декабря 1959 г.**

мощность **10 МВт**

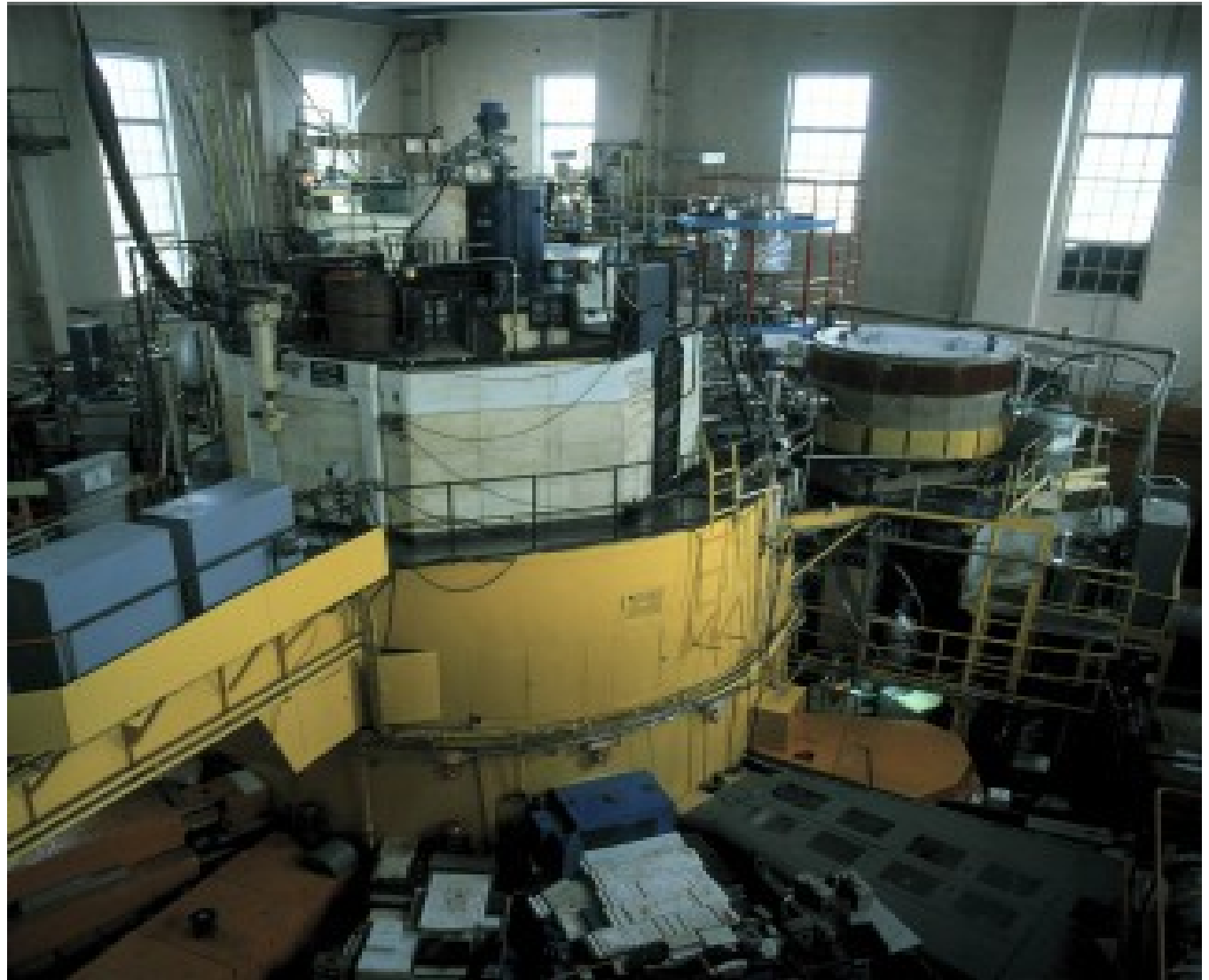
Модернизирован, мощность **18 МВт.**

Поток нейтронов - **10^{14} н/с см²**

Работает по сей день

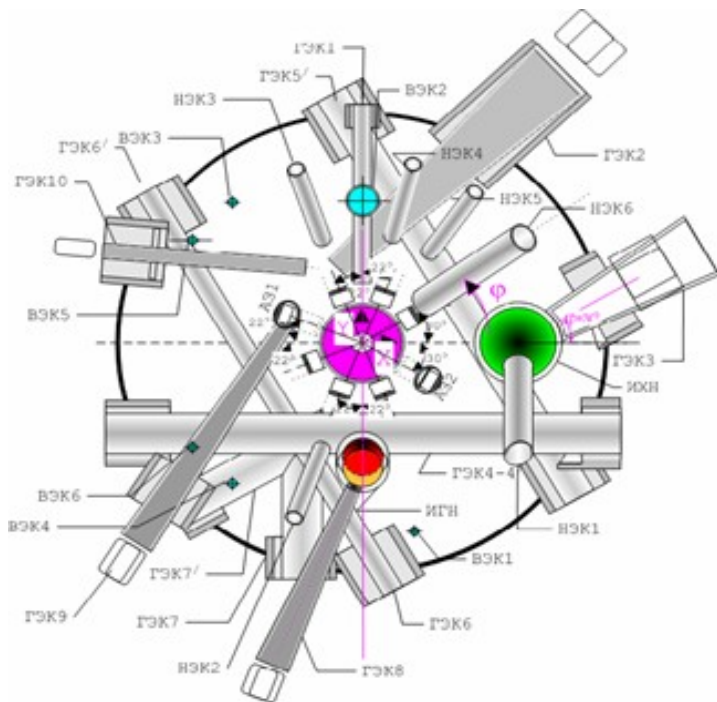


BBP-M



Реактор ПИК (ПИЯФ, Гатчина)

Мощность — **100 МВт**,
 Поток нейтронов — **10^{15} н/с см²**
 Объем активной зоны **50 л**
 Тепловыделение — **2 МВт/л**



Пульт управления



Шахта реактора ТИК



Зал горизонтальных каналов

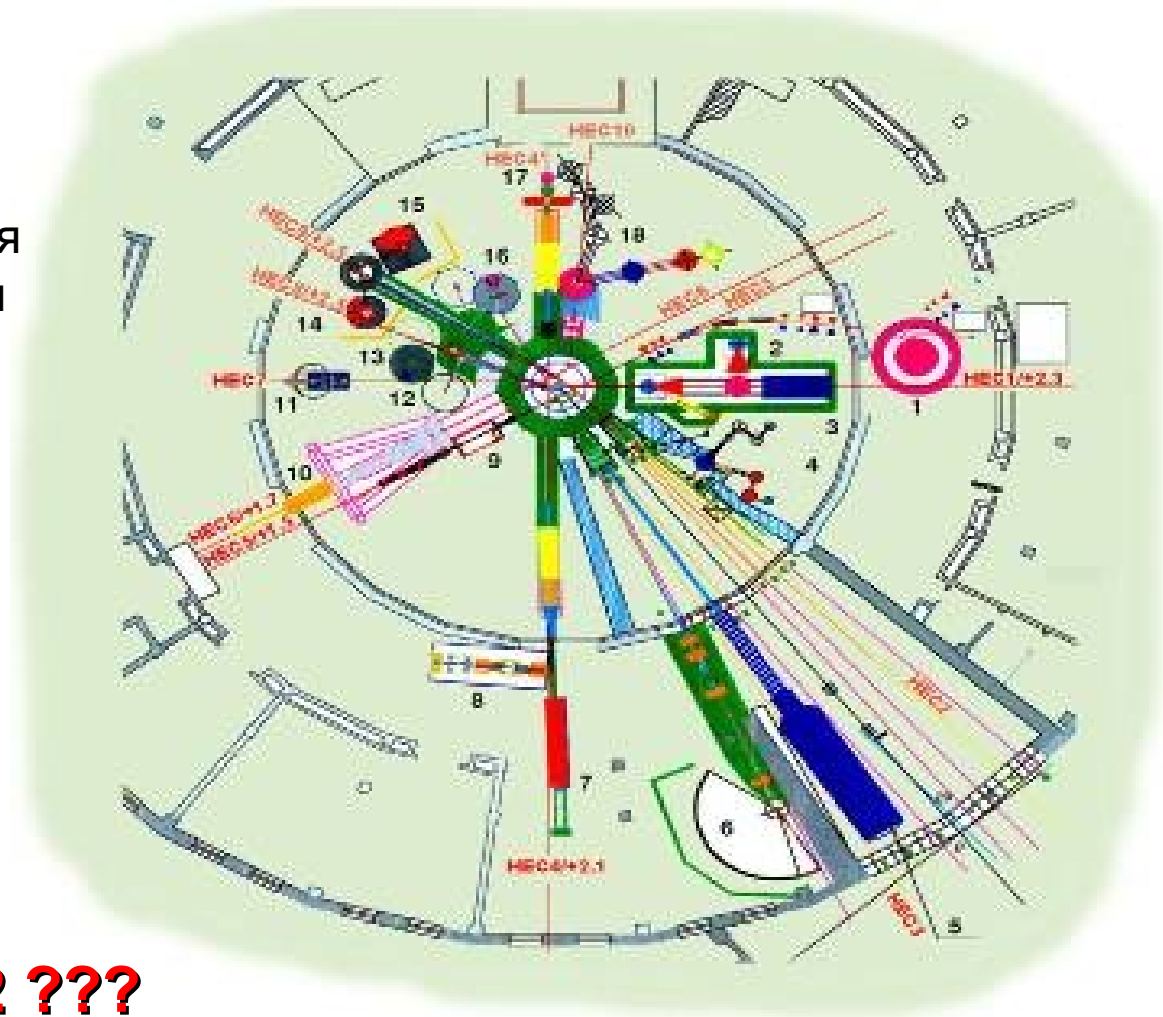


Технологический зал



Размещение экспериментальных установок

Всего около 50 позиций для размещения установок для исследований по физике конденсированного состояния и физике элементарных частиц



Год запуска — **2012 ???**

Нейтрон как инструмент для исследования материи

Нейтроны электрически нейтральны, поэтому их проникающая способность значительно превышает проникающую способность электронов и даже рентгеновских лучей.

Нейтроны обладают магнитным моментом, и это свойство делает их практически единственным инструментом для «прямого» исследования магнитной структуры вещества.

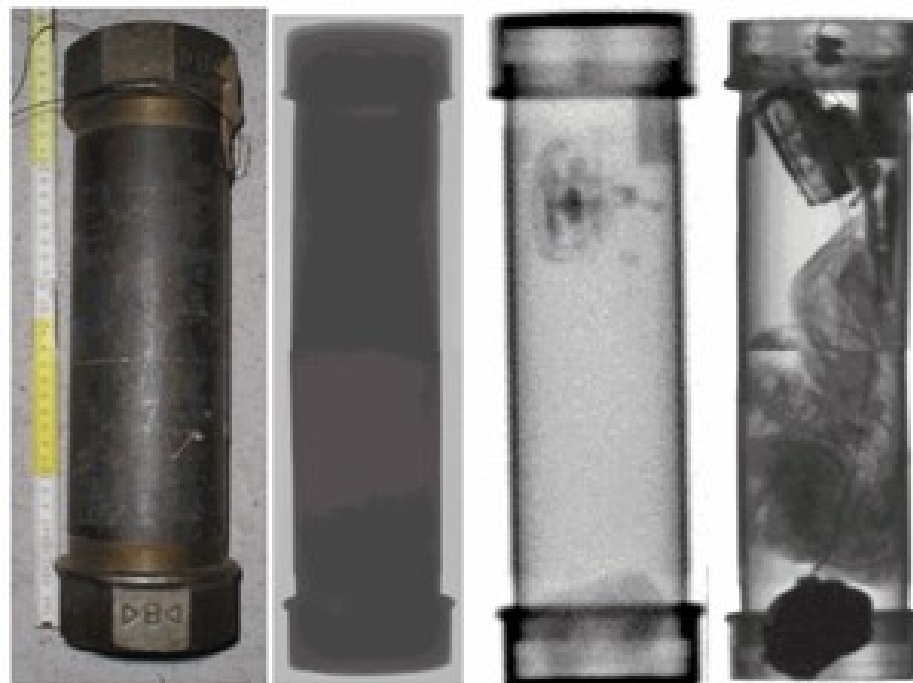
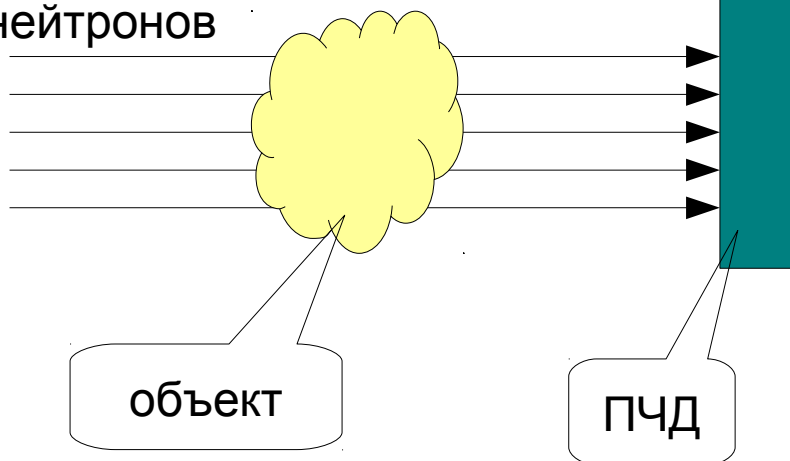
Энергия тепловых нейтронов близка к энергии коллективных возбуждений

Чувствительность к легким элементам (водород, кислород и др.),

Возможность исследования «больших» объектов от биологических соединений до наночастиц.

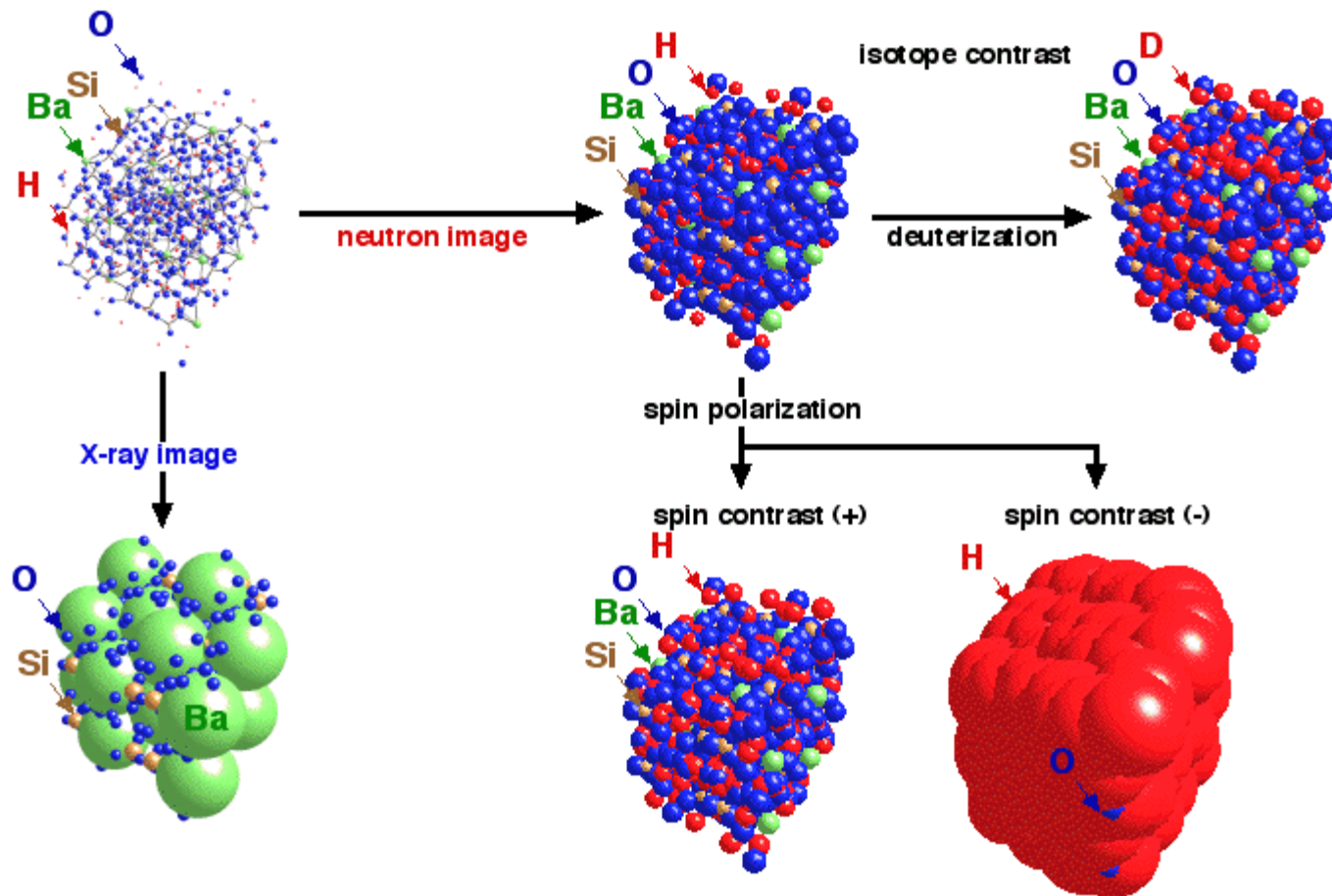
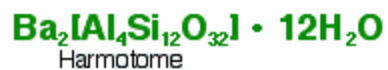
Структурная нейтронография

пучок
нейтронов

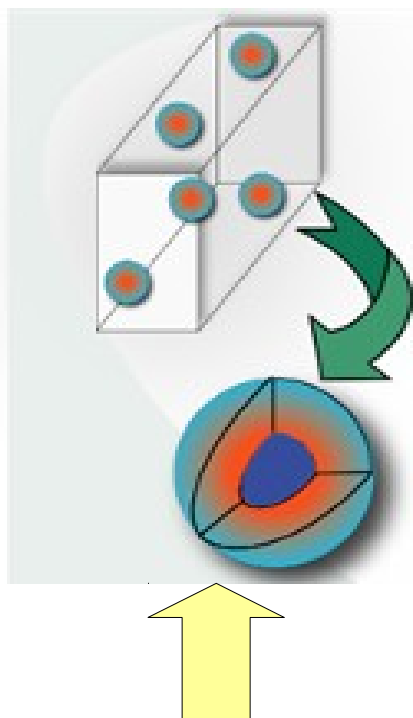


Возможности различных видов излучения продемонстрированы на примере исследования содержимого муляжа бомбы со стальным корпусом: обычное фото слева, следующие – рентгеновские лучи 150 keV, гамма излучение 1,3 MeV и тепловые нейтроны.

Чувствительность к водороду



Водородная энергетика



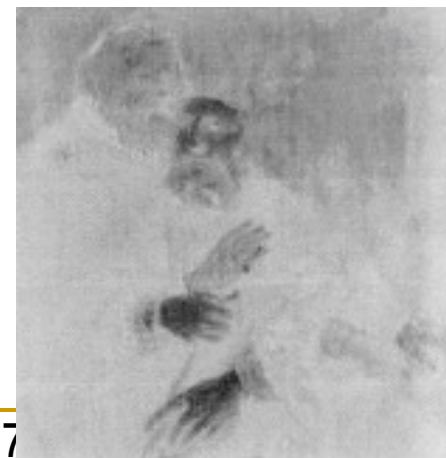
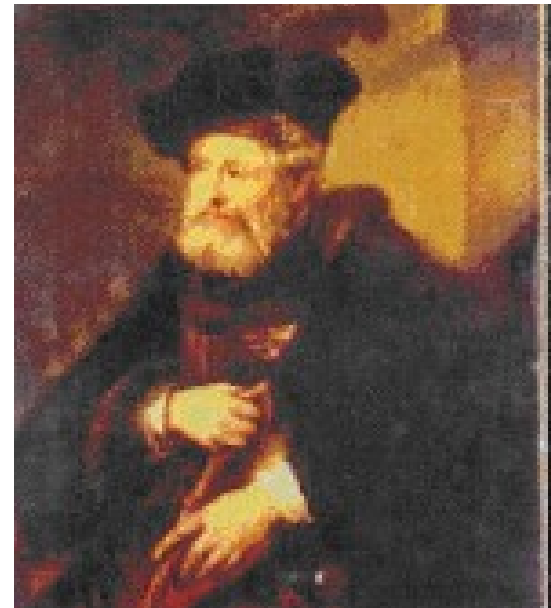
Нейтроны позволяют «видеть» положение атомов **водорода** в структуре на фоне **тяжелых атомов**. Именно такая ситуация имеет место при создании **топливных элементов**, когда атомы водорода, как в резервуар для хранения и последующего выведения оттуда, внедряются в материал-носитель, состоящий из тяжелых атомов, обычно металлов. Где именно в материале-носителе находятся атомы водорода, что с ними происходит при том или ином воздействии на материал-носитель и как он сам изменяется – на все эти и другие вопросы могут дать ответ нейтронные исследования.

Интересные результаты получены сотрудниками **ПИЯФ РАН**: в некоторых материалах-носителях атомы **водорода распределяются не хаотично, а концентрируются, образуя кластеры**.

Нейтроны и искусствоведение

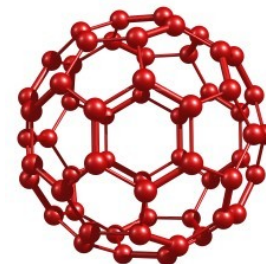
В институте Гана-Мейтнер в Берлине была исследована копия известного полотна Рембрандта «Старик с тростью в шляпе с пером». На рентгенограмме под портретом четко проявилось изображение другого известного полотна Рембрандта «Проповедник Элизар Свалмиус». Окончательная разгадка пришла после исследования полотна с помощью нейтронов. Нейтронограмма показала, что состав красок обоих рисунков одинаков, из чего следует, что обе копии были выполнены в одной мастерской. Состав красок отличается от состава красок, использовавшихся в мастерской Рембрандта, а между написанием обеих копий прошел достаточно большой промежуток времени.

Из вышесказанного следует, что обе копии не принадлежат кисти Рембрандта или кого либо из его ближайших учеников.

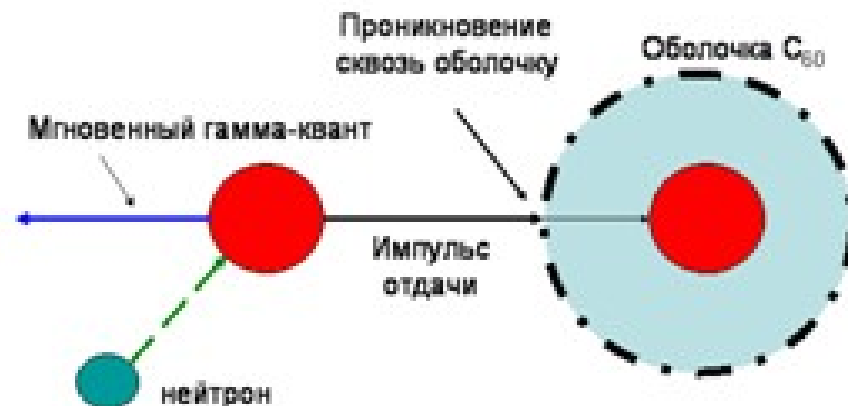


Радиоактивные металлофуллерены в ядерной медицине

Это эффективные препараты для диагностических и терапевтических целей.



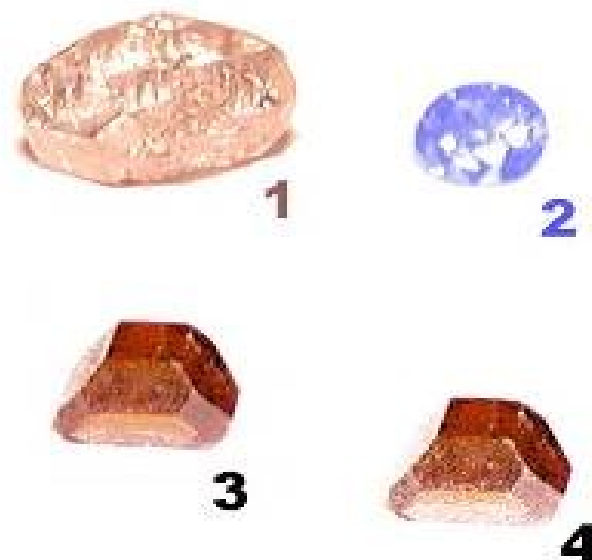
Радиоактивные эндоэдрические металлофуллерены весьма перспективны для использования в ядерной медицине. Металлофуллерены, будучи внутренне допированы радиоактивными изотопами, могут быть особенно полезны при использовании для целей медицинской диагностики, терапии рака и иммунотерапии.



Модифицирование свойств природных минералов



Обычно цвет топазов меняется в зависимости от **примесей**. Малым спросом в качестве драгоценного камня пользуется наиболее широко распространенный бесцветный топаз, он и стоит недорого. Однако **после облучения в нейтронном потоке бесцветные топазы расцветают**



- 1 - бесцветный, 1.5 карат.
- 2 - голубой бриллиант 0.3 карат.
- 3 - синтетический, 1.2 карат.
- 4 - синтетический, 1.3 карат.