

Лекция №5 по курсу
“Правовые и международные аспекты
нераспространения”

Ядерные программы США и СССР

Куликов Евгений Геннадьевич

*Национальный исследовательский ядерный университет
“МИФИ”, Москва*

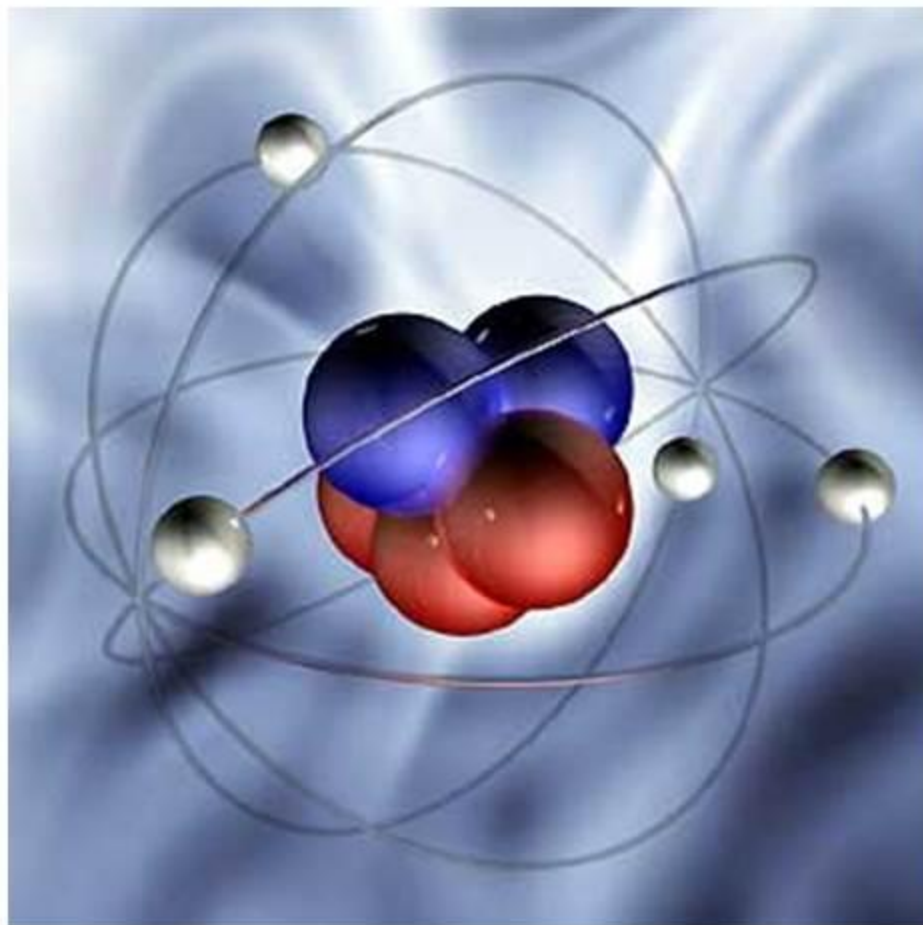
План

1 Роль ученых в освоении энергии ядра

2 Создание атомного оружия в США

3 Создание атомного оружия в СССР

1 Роль ученых в освоении энергии ядра



Открытие радиоактивности (Беккерель)

1896: Французский физик А.А. Беккерель исследует фосфоресценцию солей урана

- ✓ фосфоресценция – процесс, когда энергия, поглощенная веществом, медленно высвобождается в виде света (“светящиеся в темноте” материалы, которые “заряжаются” на свету)
- ✓ готовясь к опыту, убрал соль урана в ящик стола, где лежали фотопластинки
- ✓ фотопластинки засвечены, без света!
- ✓ **вывод:** соли урана сами по себе без внешних воздействий испускают невидимые лучи, засвечивающие фотопластинки

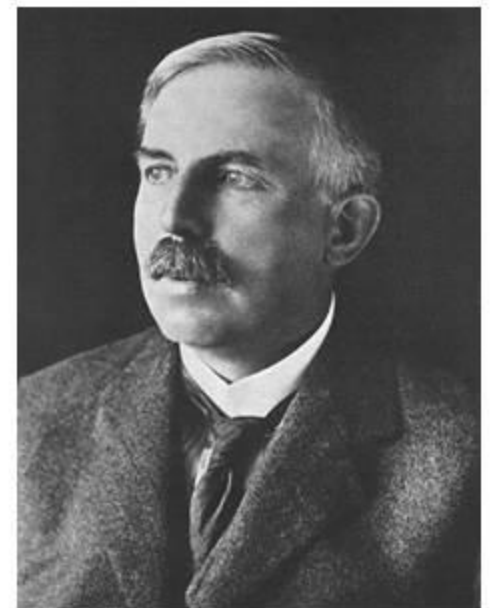


Нобелевская премия за открытие радиоактивности урана

Открытие атомного ядра (Резерфорд)

1911: Английский физик Э. Резерфорд проводит опыт по рассеиванию α -частиц

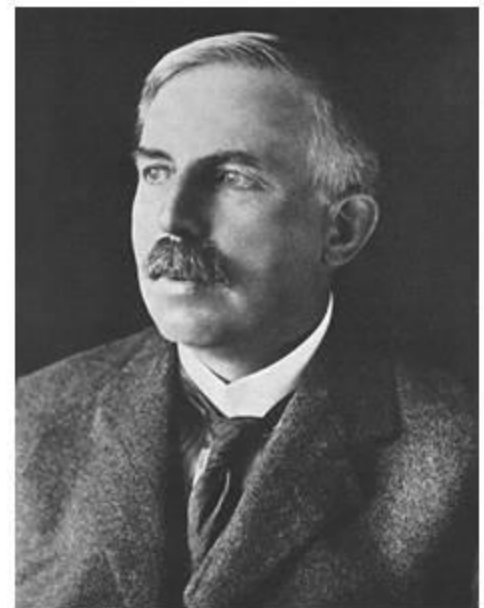
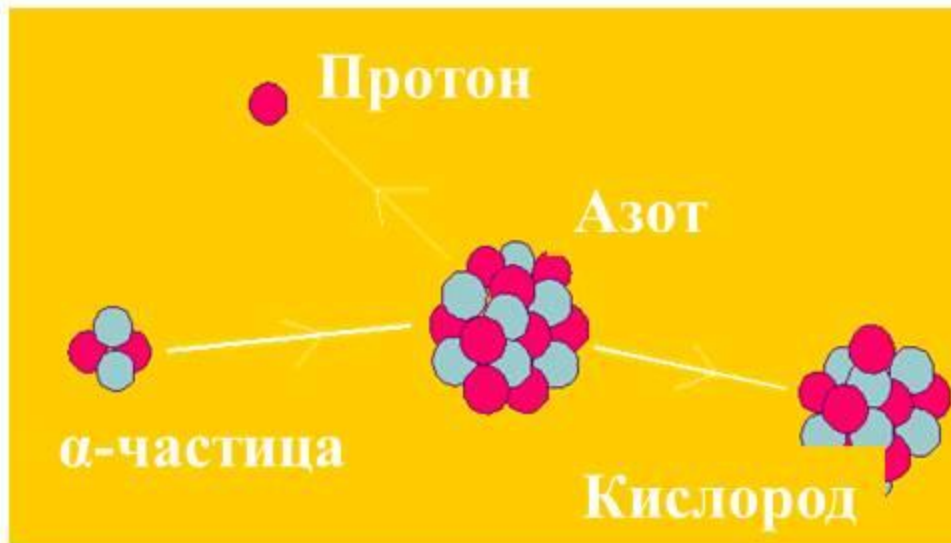
- ✓ прохождение α -частиц сквозь тонкие слои металла: большинство на вылет, но часть отклоняется на углы $> 90^\circ$
- ✓ **вывод:** атом содержит центральный заряд малого объема, окружен сферическим распределением противоположенного электричества равной величины



Ядерная реакция (Резерфорд)

1919: Английский физик Э. Резерфорд проводит опыт по облучению атомов азота α -частицами

- ✓ первая в мире искусственная ядерная реакция
- ✓ испускаются положительно заряженные частицы, являющиеся основными структурными элементами ядер: Резерфорд называет их протонами
- ✓ массы всех ядер (в том числе изотопов) кратны массе протона: предсказание нейтрона

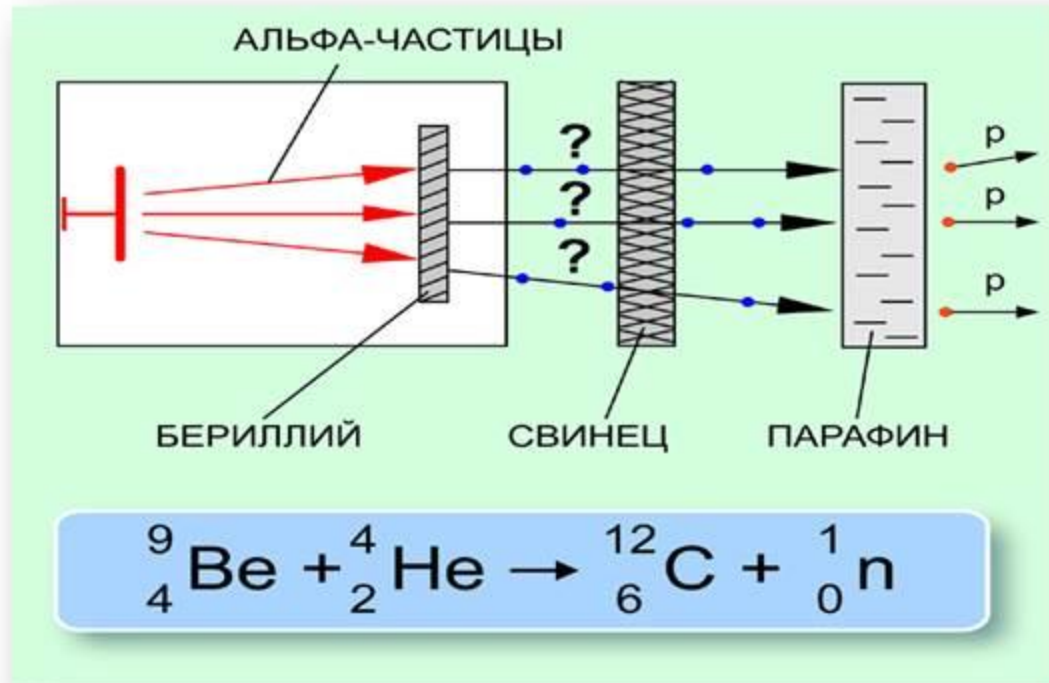


Открытие нейтрона (Чедвик)

1932: Английский физик Дж. Чедвик

проводит опыт по облучению атомов бериллия α -частицами

- ✓ зарегистрировано излучение, пронизывающее 20 см слой свинца (он задерживал все другие излучения)
- ✓ проходя через парафин, это излучение выбивало протоны
- ✓ по свойствам протонов определены свойства нейтронов



Нейтрон

✓ **Заряд:** не имеет (нейтрален)

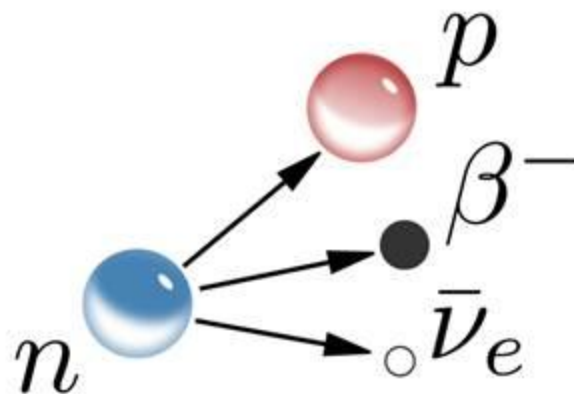
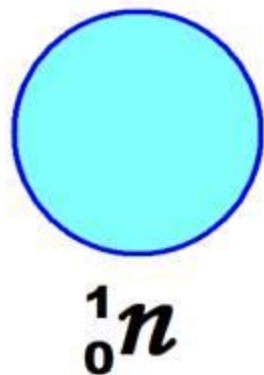
- легко проходит сквозь вещество

✓ **Масса:** ~ масса протона (1800 масс электрона)

✓ **Стабильность:** нестабилен

(в отличие от протона и электрона)

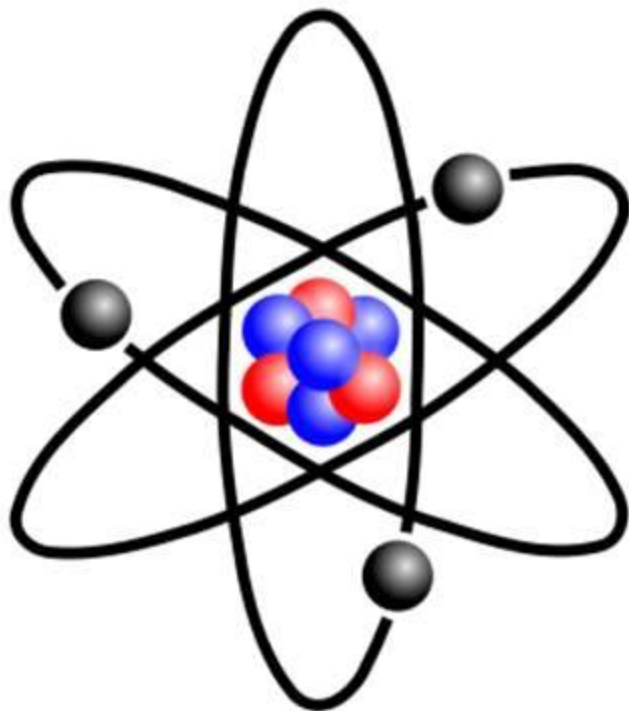
- не может существовать “сам по себе” (в свободном состоянии) сколь угодно долго
- период полураспада: 10 минут
- распадается на: протон, электрон и антинейтрино



Протонно-нейтронная модель ядра

1932: Советский физик Д.Д. Иваненко предложил протонно-нейтронную модель ядра

- ✓ ядра всех атомов состоят из положительно заряженных **протонов** и нейтральных **нейтронов**
- ✓ число протонов в ядре равняется числу электронов в атомной оболочке, так как атом в целом нейтрален



“Год чудес” и “Великое трехлетие”

1932

- ✓ открытие нейтрона
- ✓ протонно-нейтронная модель ядра
- ✓ открытие дейтерия (изотоп водорода с массой, равной 2)
- ✓ открытие позитрона (античастица электрона)

1933

- ✓ открытие тяжелой воды (D_2O)
- ✓ образование электрон-позитронных пар

1934

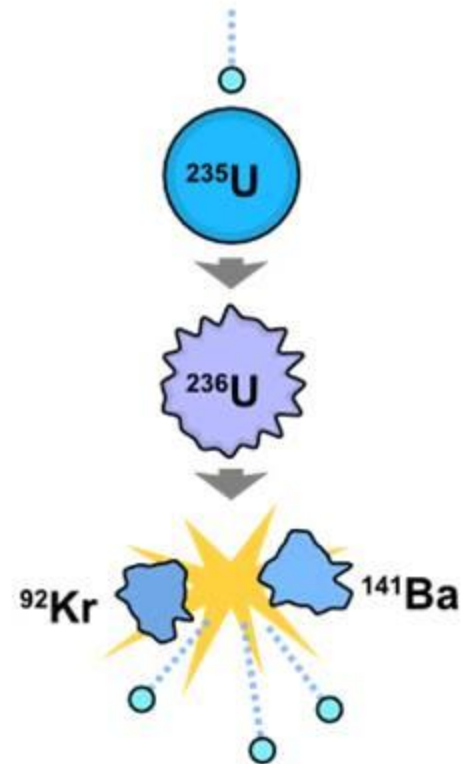
- ✓ теория бета-распада
- ✓ облучение урана нейтронами
 - получение новых элементов 93 и 94 (Np и Pu)
- ✓ предсказание возможности деления ядер урана

Значительный прорыв в ядерной физике за три года
→ **есть все теоретические предпосылки для создания ЯО**

Деление тяжелых ядер

1939: Немецкие ученые О. Ган и Ф. Штрассман открыли деление ядер урана

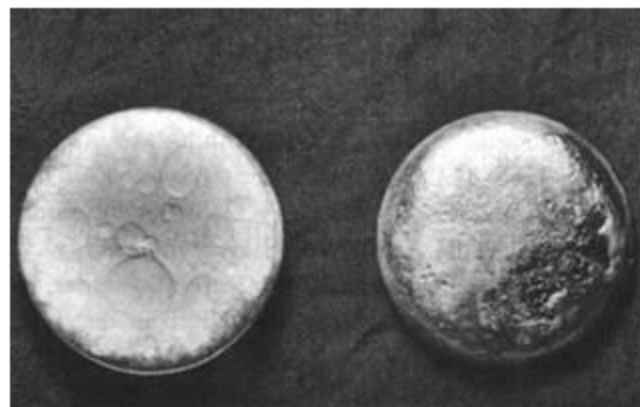
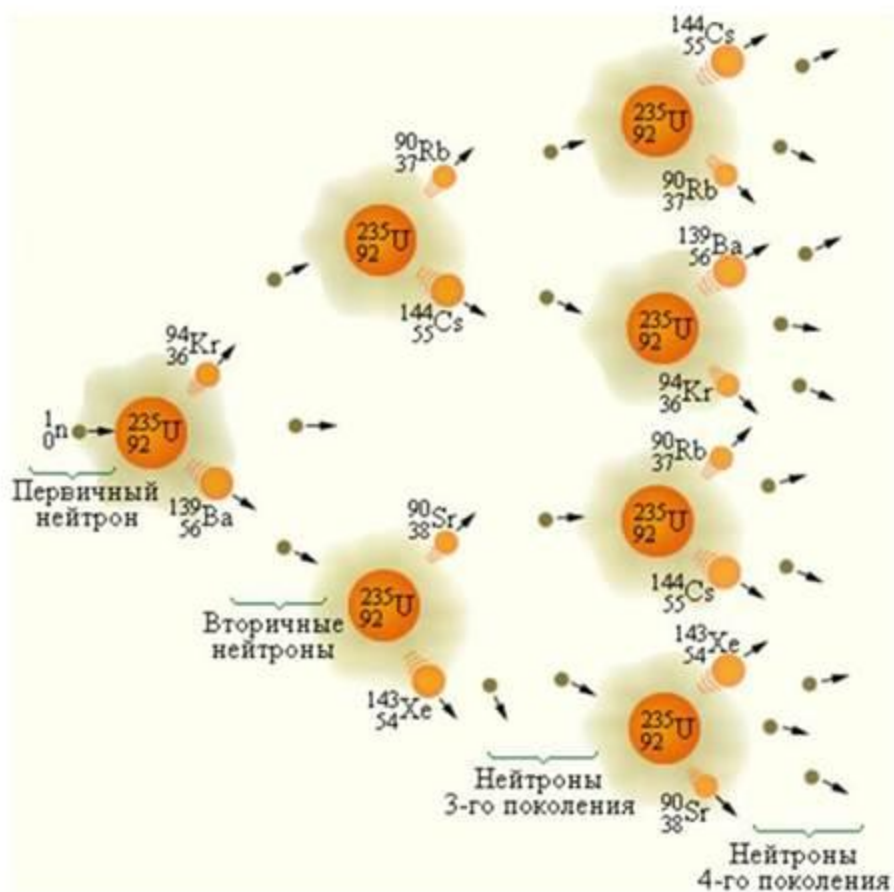
- ✓ некоторые ядра делятся на две примерно равные части с высвобождением огромной энергии
- ✓ первая искусственная реакция деления тяжелых ядер



Цепная реакция деления

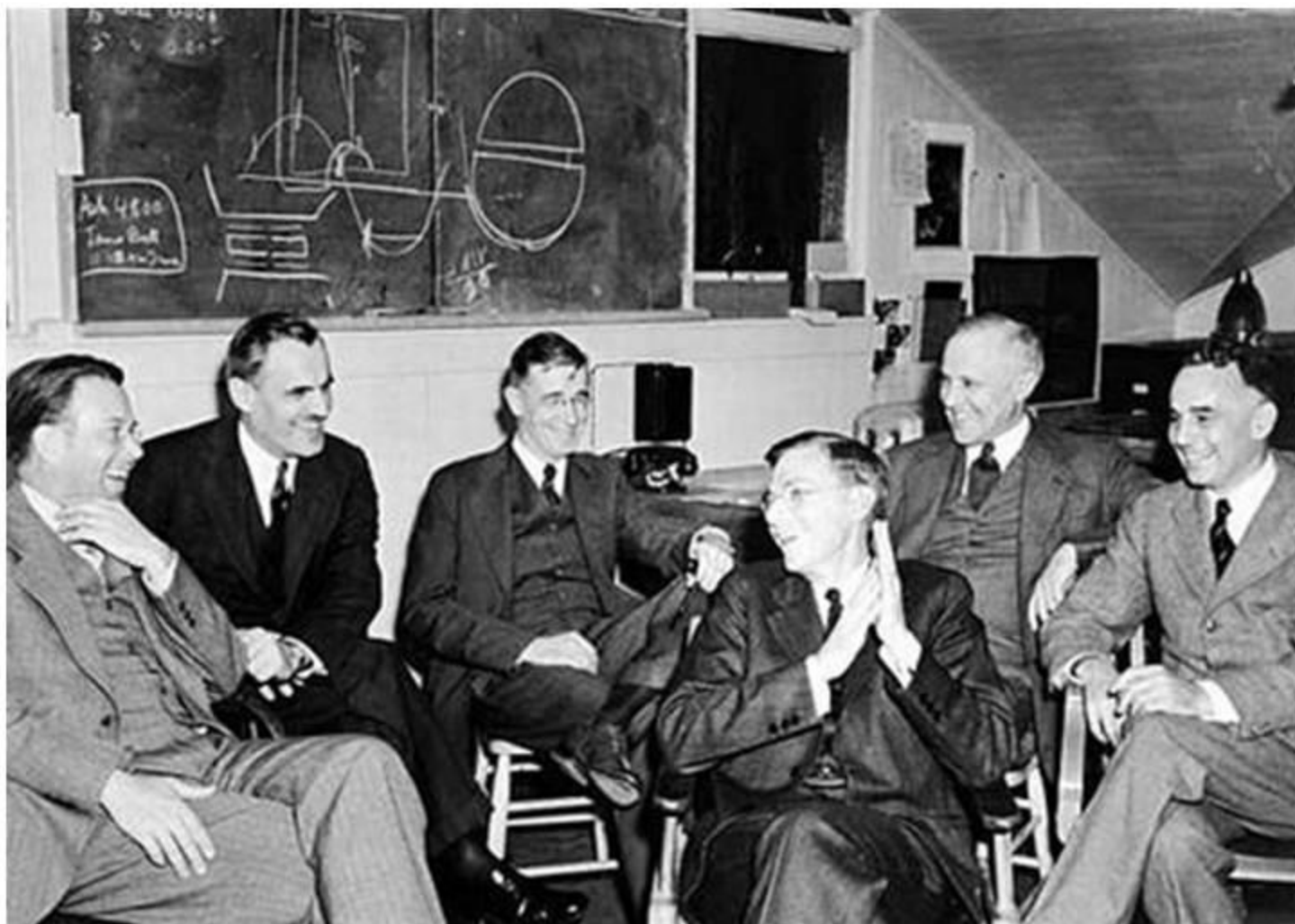
1939: Ученые США, СССР, Англии, Франции

- ✓ выясняют цепной характер реакции деления
- ✓ выясняют решающую роль изотопа ^{235}U
- ✓ Pu делится также хорошо, как и у ^{235}U



2

Создание атомного оружия в США



Ситуация в 1939 году

- ✓ Европа на пороге Второй мировой войны
- ✓ стремление к обладанию мощным оружием
- ✓ ученые осознают опасность ЯО
- ✓ письмо президенту США за подписью А. Эйнштейна: обеспокоенность по поводу возможности создания в Германии “чрезвычайно мощной бомбы нового типа”
- ✓ президент США Ф. Рузвельт отнесся к письму с большим вниманием

Создается Урановый комитет (S-1 Uranium Committee)

Доклад Уранового комитета (1939)

Доклад Уранового комитета президенту США Ф. Рузвельту

- ✓ сила взрыва нескольких килограмм ^{235}U или ^{239}Pu ~ несколько тысяч тонн обычных взрывчатых веществ
 ЯО мощнее обычного в миллион раз
- ✓ два пути к ЯО
 - обогащение U (завод по обогащению)
 - наработка Pu (реактор + завод по переработке ОЯТ)
 нельзя утверждать какой метод предпочтительнее
- ✓ Можно проектировать и строить крупные промышленные установки
- ✓ При наличии финансов и прерогатив программу можно начать быстро, чтобы она приобрела военное значение

Рузвельт отдает приказ о создании ЯО

Манхэттенский инженерный округ

- ✓ первое время работы по созданию ЯО носят только **исследовательский характер**
- ✓ у Германии возрос интерес к ЯО → А. Эйнштейн просит президента США **ускорить процесс создания ЯО**
- ✓ президент США передает проект **под контроль армии**
- ✓ 1942: для реализации программы (заводы, лаборатории) создан **Манхэттенский инженерный округ**

Штаб-квартира в Манхэттене

**Отсюда название проекта
по созданию ЯО в США**



Секретность, размах и специалисты

Сверхсекретный проект

- ✓ даже Госдепартамент США не знал, что скрывается за вывеской Манхэттенского проекта
- ✓ проект имел свою полицию, контрразведку, систему связи, склады, поселки, заводы, лаборатории
- ✓ засекретили книги и статьи о возможности создания ЯО
- ✓ принцип изолированности: каждый работник знал только те детали, которые касались его работы

Размах

- ✓ по размаху работ и размерам капиталовложений остается самым крупным научным проектом (26 млрд. \$ 2016 года)

Специалисты

- ✓ спасаясь от фашизма многие ученые → США
- ✓ бомбардировки в Англии:
 - она передает США разработки и ведущих ученых
 - заводы строятся в США, где нет войны

Руководители проекта



Руководитель проекта

*Генерал
Лесли Гривс*



Технический руководитель

*Профессор физики
Роберт Оппенгеймер*

Карта проекта

Штаб-квартира

Вашингтон

Лесли Гривс

руководит проектом

Университет Чикаго

Первый искусственный реактор

Заводы по переработке ОЯТ

Хэнфорд

Выделение Pu из ОЯТ

Реакторы

Хэнфорд

Наработка Pu

Лаборатория

Лос-Аламос

Роберт Оппенгеймер

сборка ЯВУ

Полигон

Аламогордо

Первый тест ЯВУ

Реактор X-10 Ок-Ридж

Первые значимые

количества Pu

К-25 Ок-Ридж

**Газодиффузионное
обогащение урана**

Y-12 Ок-Ридж

Электромагнитное

обогащение урана



Реактор Chicago Pile - 1 (Чикаго, 1942)

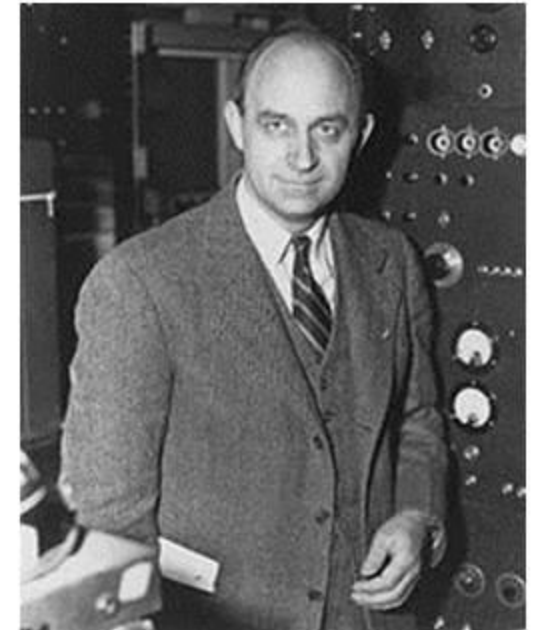
Первый в мире искусственный реактор (построен Э. Ферми)

✓ **Конструкция**

- природный уран (40 т) + графит (350 т)
- нет охлаждения и защиты

→ мог работать недолго и на низкой мощности (1 Вт)

✓ **Цель** экспериментальное осуществление управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления



Реактор X-10 (Ок-Ридж, 1943)

Первый реактор для получения Pu (построен Э. Ферми)

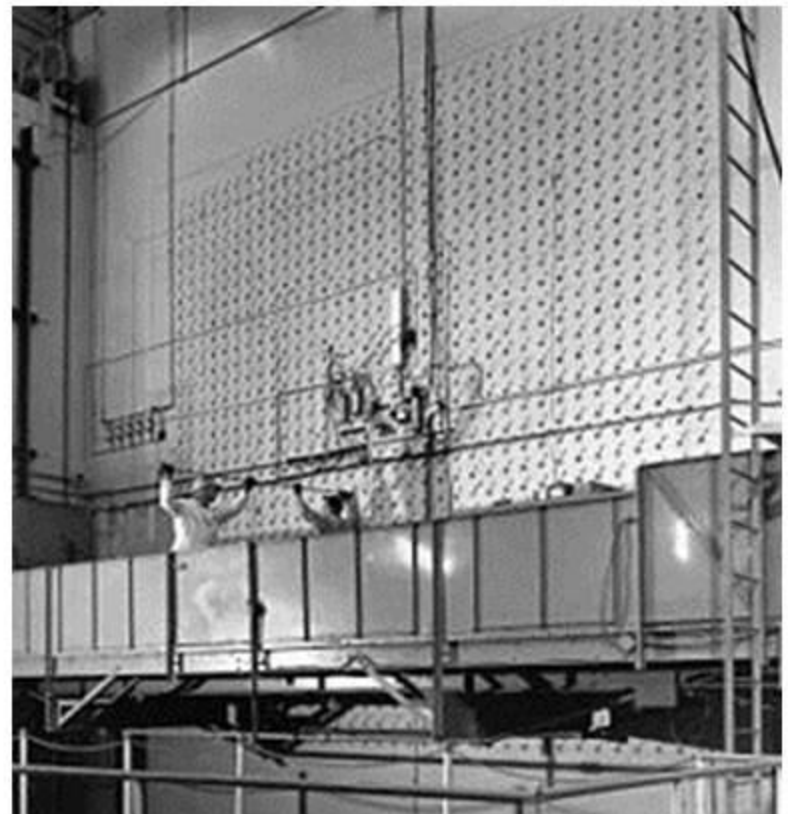
✓ **Конструкция**

- природный уран + графит (7 × 7 м)
- воздушное охлаждение
- биологическая защита (бетон)

✓ **Рядом переработка ОЯТ**

✓ **Цель** получение значимых количеств Pu для исследований

- хорошо ли делится Pu?
- как выделить Pu из ОЯТ?



Хэнфордский завод (Хэнфорд, 1944)

**Это 9 реакторов и 5 заводов химической переработки
В том числе Реактор В**

✓ Первый реактор для **промышленного производства Pu**

✓ **Конструкция**

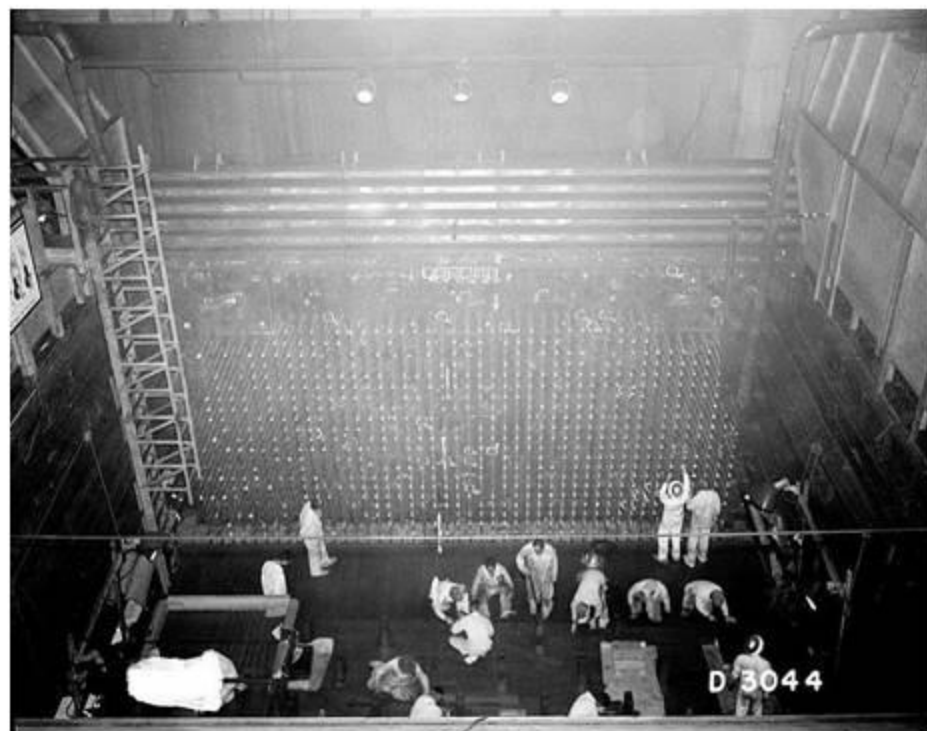
- природный уран (180 т) + графит (1100 т)
- водяное охлаждение
- $W = 250 \text{ МВт}$
- 6 кг Pu / месяц

✓ **Сложность с переработкой**

- радиоактивность

✓ **Ускорение наработки Pu**

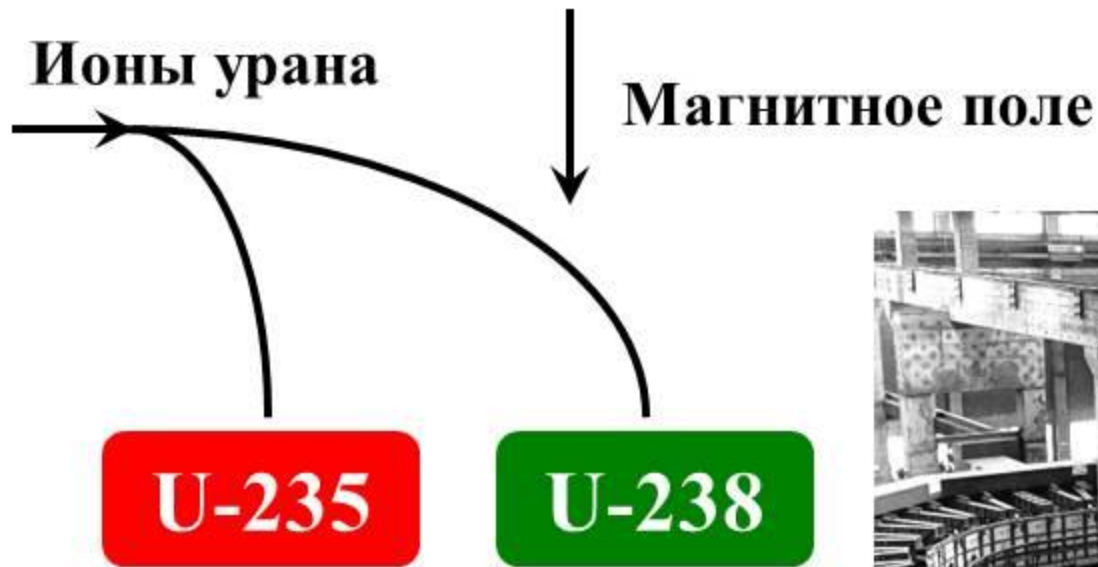
- пуск реактора D (1944)
- пуск реактора F (1945)



Завод Y-12 (Ок-Ридж, 1943)

Завод по обогащению урана электромагнитным методом

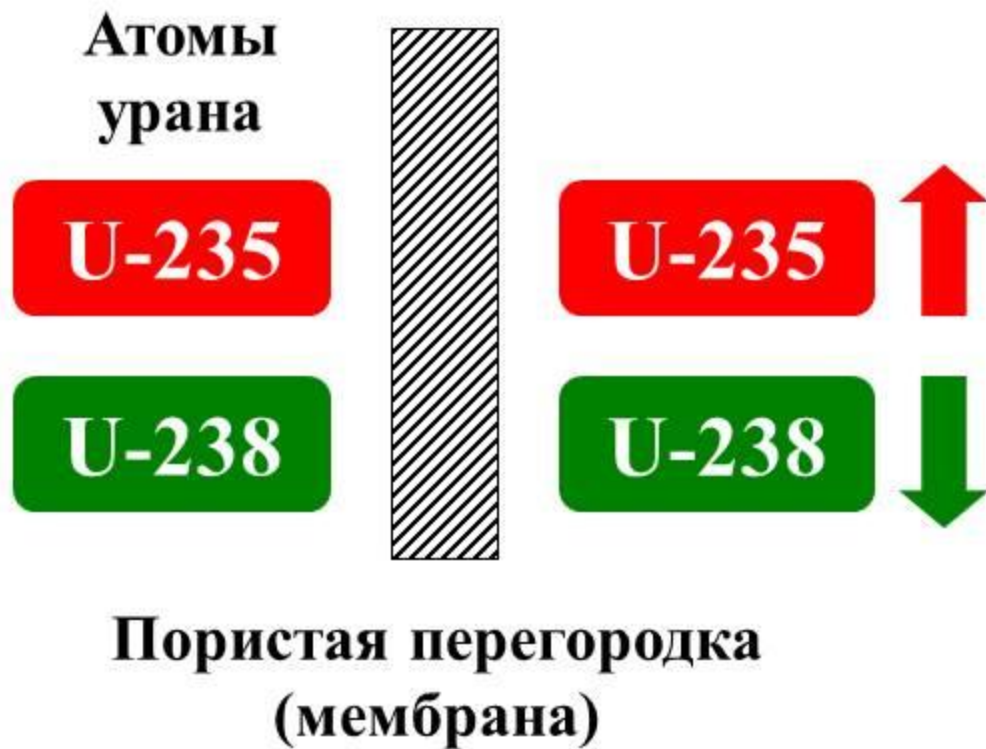
- ✓ Суть разное поведение ионов в магнитном поле
- ✓ Сложность очень низкое КПД (0.05 %) → много стадий



Завод К-25 (Ок-Ридж, 1943)

Завод по обогащению урана газодиффузионным методом

- ✓ Суть разная способность проникать ($E = \text{const}$, m разные)
- ✓ Сложность создание мембран → пуск завода отложен



Какой материал? Какое ЯВУ?

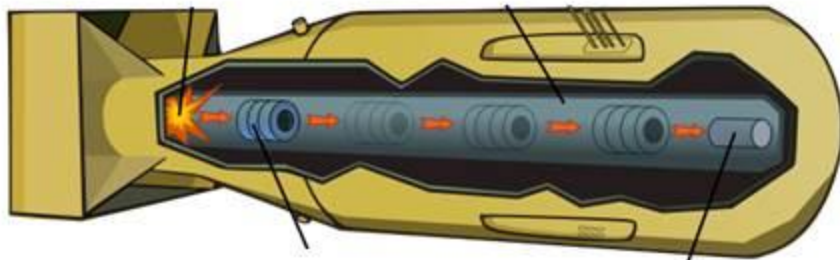
5 апреля 1944

- ✓ первая партия Pu из реактора X-10
- ✓ исследование свойств Pu

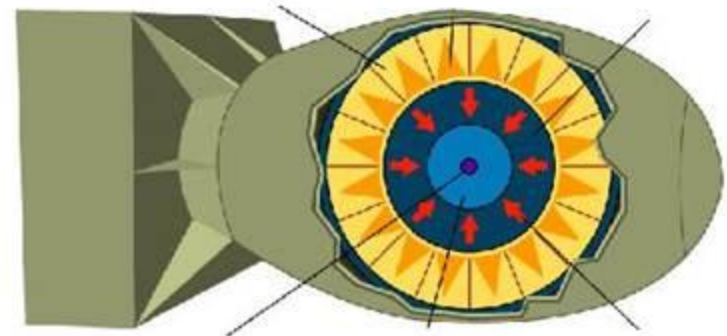
15 апреля 1944

- ✓ интенсивность спонтанного деления Pu очень велика
- ✓ если ЯВУ ствольного типа, то “пшик”
- ✓ перебрасываются все силы на ЯВУ имплозивного типа

Май 1944 прогресс в создании ЯВУ имплозивного типа



Простое ЯВУ
Нет урана



Сложное ЯВУ
Есть плутоний

Положение дел (конец 1944 – начало 1945)

ВОУ

- ✓ **Y-12** рост темпов с 40 до 200 грамм ВОУ / день
- ✓ **K-25** созданы пригодные мембраны → загрузка UF_6

Pu

Хэнфорд рост темпов с 6 до 18 кг Pu / месяц

Технологии ЯВУ

- ✓ **ствольное ЯВУ** проект утвержден
- ✓ успешные испытания детонационных линз
→ уверенность в создании **имплозивного ЯВУ**

**К середине 1945 года все технические проблемы решены
(есть ЯМ, есть проекты ЯВУ)**

Тринити – первое в мире испытание ЯО

16 июля 1945 года (Аламогордо)

- ✓ в центре – башня высотой 30 м
- ✓ вокруг – регистрирующая аппаратура
- ✓ имплозивное ЯВУ на основе Pu
- ✓ $W = 20$ кт (2000 крупнейших бомб ВМВ)



0.016 с после взрыва (диаметр 200 м)



Хиросима и Нагасаки – применение ЯО

- ✓ Япония отказывается капитулировать
→ у США железный предлог для применения ЯО
- ✓ Хиросима (ЯО ствольного типа, U)
- ✓ Нагасаки (ЯО импловзивного типа, Pu)
- ✓ 200 000 погибших



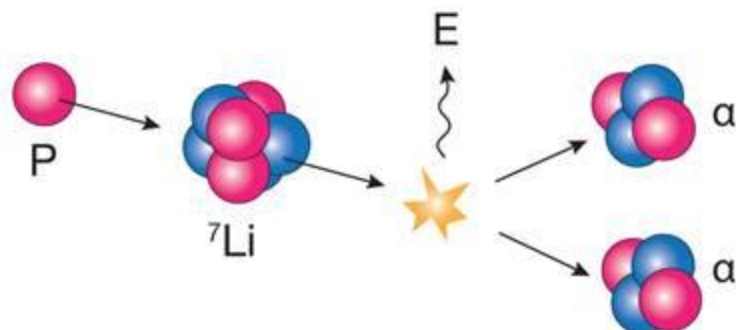
3

Создание атомного оружия в СССР



Предвоенный период

- ✓ **радиохимические исследования** (позже для выделения Pu)
- ✓ **1932: расщепление ядра лития**



- ✓ **1937: обоснование разделения газов центрифугированием** (освоено в промышленных масштабах для урана в 60-е гг.)
- ✓ **1939: обоснована возможность цепных ядерных реакций**
- ✓ **1940: открытие спонтанного деления урана**

Урановая комиссия (1940)

Цель

- ✓ изучение свойств урана
- ✓ как использовать внутриатомную энергию урана?
исследовательский, а не военный характер

Задачи

- ✓ механизм деления ядер урана и тория
- ✓ как поддержать цепную реакцию в природном уране?
- ✓ как разделить изотопы урана?

Игорь Васильевич Курчатов

“хотя принципиально вопрос об осуществлении цепного ядерного распада и решен ... на пути **практической реализации ... возникают громаднейшие трудности**”

Военный период (1941-1945)

Все ресурсы – на военные цели

- ✓ ведущие институты эвакуированы
- ✓ многие ученые пошли сражаться на фронт
→ исследования почти прекратились

Физик-ядерщик Г.Н. Флеров

- ✓ полное прекращение публикаций по делению ядер урана в Германии, Англии, США
- ✓ засекречивание исследований
→ надо возобновить работы

1943: научный центр Лаборатория №2

- ✓ Руководитель: И.В. Курчатов
- ✓ Цель: создание ЯО
- ✓ Работы:
 - создание экспериментальной базы
 - теоретические расчеты
- ✓ Ныне НИЦ “Курчатовский институт”



Роль разведки

На Западе секретные работы по созданию ЯО

- может быть создано до конца войны
- может повлиять на ее ход

✓ **Немецкий физик К. Фукс (9 лет тюрьмы)** исходя из политических убеждений и осознавая опасность ядерной монополии, к которой стремились США

- предупредил СССР о работах по созданию ЯО
- передал сведения по устройству ЯО

✓ **Американский физик Т. Холл (уволен)** передает СССР

- схему имплозивного ЯВУ на основе Pu
- описание процессов выделения Pu

Оба – участники Манхэттенского проекта



Специальный комитет (1945)

До 1945: ограниченные исследования в СССР

- ✓ военная обстановка
- ✓ СССР не верил в создание ЯО в США и Германии

1945: первое испытание и применение ЯО

→ СССР поверил, что ЯО действительно существует

Создан Специальный комитет

- ✓ строительство **первого исследовательского реактора**
- ✓ строительство **промышленного реактора для наработки Pu**
- ✓ создание оборудования для **обогащения урана**
электромагнитным и газодиффузионным методом
- ✓ выбрана площадка под строительство **завода для конструирования ЯО** (Саров, сейчас – ВНИИЭФ)

Реактор Ф-1 (Москва, 1946)

Первый в СССР реактор (построен И.В. Курчатовым)

✓ Конструкция

- природный уран (45 т) + графит (400 т)
- нет охлаждения и защиты
 - может работать недолго и на низкой мощности
 - при > 10 кВт – дистанционно (1.5 км)

✓ Цель

- самоподдерживающаяся цепная реакция деления
- получение Pu для исследований (~ мг)
- оценка параметров промышленного реактора (шаг решетки, размеры)



Промышленный реактор А (Озерск, 1948)

Первый в СССР реактор для промышленной наработки Pu

✓ Конструкция

- природный уран + графит
- водяное охлаждение
- защита (бетон и железная руда)
- вертикальные ТВЭЛы (нет проблем деформации)
- $W = 100$ МВт

✓ Трудности

- долгое устранение поломок
→ отравление ксеноном (простой сутки и более)
- аварии спекания U и C
- при ликвидации аварий персонал получал очень большие дозы радиации



Радиохимический завод Б (Озерск, 1948)

Первый в СССР завод по переработке ОЯТ

- ✓ **Цель** выделение Pu из ОЯТ (содержит U, Pu, ПД)
- ✓ Реактор А (ОЯТ) → завод Б (Pu из ОЯТ)
- ✓ Перед этим ОЯТ выдерживается в водном бассейне для
 - ↑ доли ^{239}Pu (распад ^{239}Np , $T_{1/2} = 2.3$ сутки)
 - ↓ радиоактивности (много короткоживущих нуклидов)
- ✓ **Трудности**
 - высокая радиоактивность → все дистанционно
 - что делать с РАО после выделения Pu?
технологий нет → сброс в окружающую среду
 - ремонтные службы и население – очень высокие дозы
- ✓ **Масштаб**
 - десятки заводов и институтов создавали оборудование
 - на строительстве 45 000 человек

Завод В ядерных зарядов (Озерск, 1949)

Завод для производства ядерных зарядов

- ✓ **Цель** получение металлического Pu
- ✓ Завод Б (Pu из ОЯТ) → завод В (металлический Pu)
- ✓ **Определены свойства Pu** (наработан в реакторе Ф-1)
 - сильное изменение $\rho(T)$: 19.8 – 14.7 г/см³ (119 – 310 °С)
→ нельзя получить однородный металл из расплава
 - α -распад: самонагревание (кусочек 50 грамм на 5-10 °С)
 - высокая токсичность: попадание в организм опасно
 - 6 аллотропических модификаций ниже T плавления
 - значительные объемные изменения
- ✓ **Трудности**
 - плохие свойства Pu → трудно получить изделия из Pu
 - образование критической массы Pu (неизвестна!)
→ на всех операциях нужен контроль массы

Испытание советской атомной бомбы

29 августа 1949 года (Семипалатинский полигон, Казахстан)

- ✓ основа – бомба США (имплозивное ЯВУ на основе Pu)
- ✓ объекты: шоссе, ж/д, здания, транспорт, военная техника
- ✓ один из руководителей атомного проекта М.Г. Первухин:
“ ... в нашем присутствии бомба была собрана, поднята на башню и укреплена ... на рассвете, примерно в 4-5 утра ... произошел взрыв первой советской атомной бомбы ... мы все выбежали наружу и увидели яркое пламенное облако, вслед за которым поднимался черный столб земной пыли, превращаясь в гигантский гриб”
- ✓ $W = 20$ кт



Роль советской атомной бомбы

США (1945)

- ✓ “Стоимость проекта, включающего возведение целых городов и невиданных доселе заводов ... небывалая по объему экспериментальная работа – все это, как в фокусе, сконцентрировано в атомной бомбе. **Никакая другая страна в мире не была бы способна на подобную затрату мозговой энергии и технических усилий”**
- ✓ США разрабатывают планы атомных ударов по СССР
- ✓ планы откладываются, так как у США пока немного ЯО, а у СССР не будет ЯО ранее 1952

СССР (1949)

- ✓ создание СССР ЯО помешало войне