

Лекция №1 по курсу
“Правовые и международные аспекты
нераспространения”

**Ядерная энергетика
и технологии двойного назначения**

Куликов Евгений Геннадьевич

*Национальный исследовательский ядерный университет
“МИФИ”, Москва*

План

1 Введение

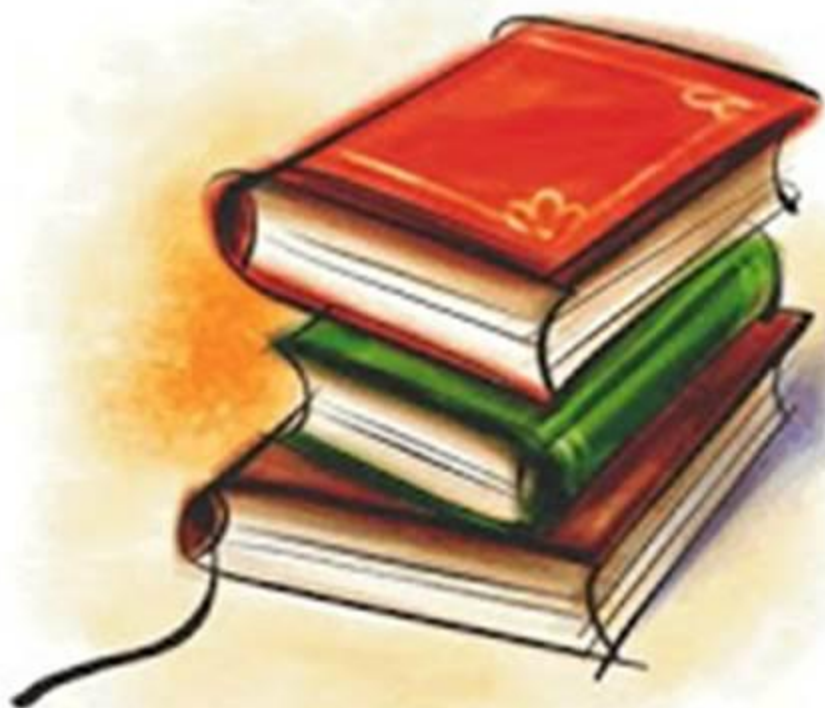
2 Ядерное оружие

3 Ядерный топливный цикл

4 Нераспространение как необходимый элемент развития ЯЭ

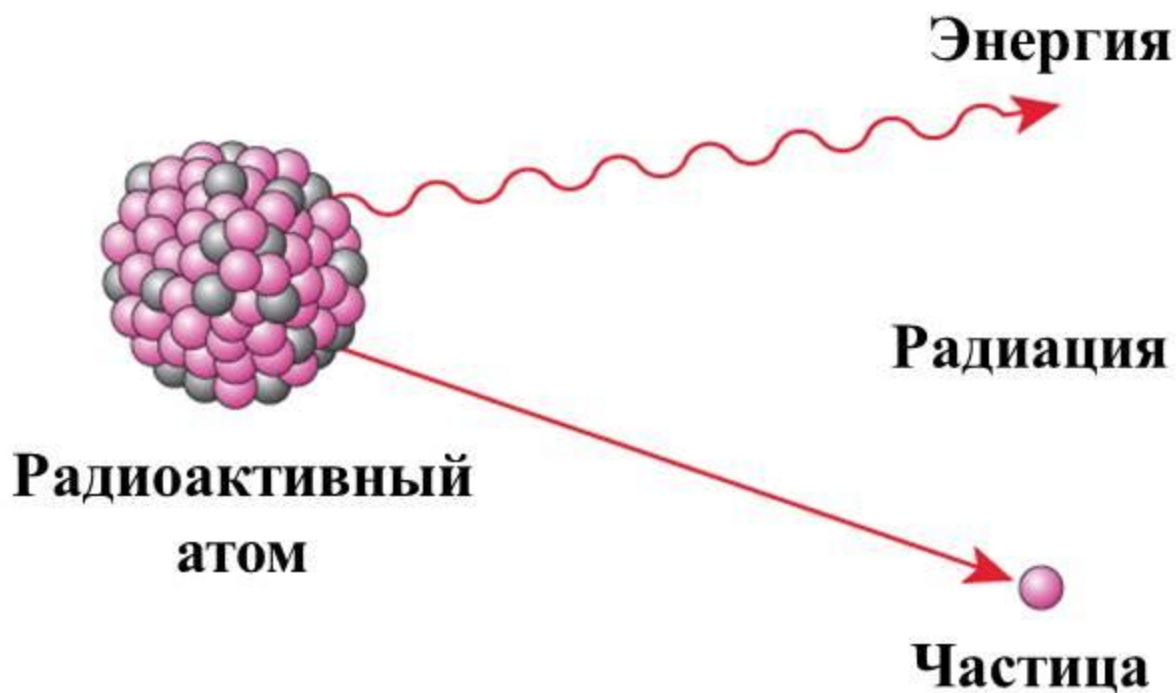
1

Введение



Радиоактивность

Радиоактивность (радиоактивный распад) – самопроизвольное изменение состава нестабильных ядер (заряда Z , массового числа A) путем испускания элементарных частиц



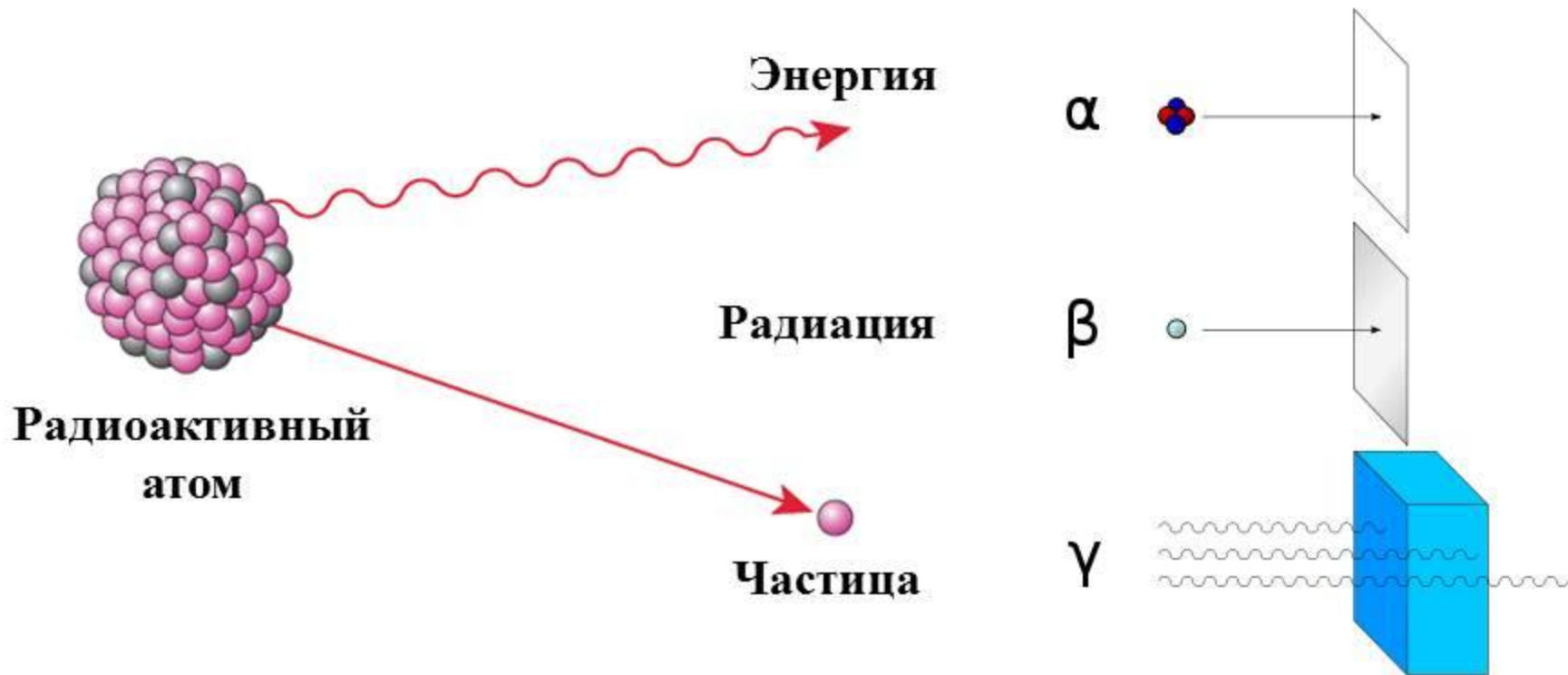
Когда появилась радиоактивность?

**Радиоактивность появились на Земле
со времени ее образования**



**Человек за всю историю развития своей цивилизации
находился под влиянием естественных источников радиации
(космическое излучение, радиоактивные элементы в Земле)**

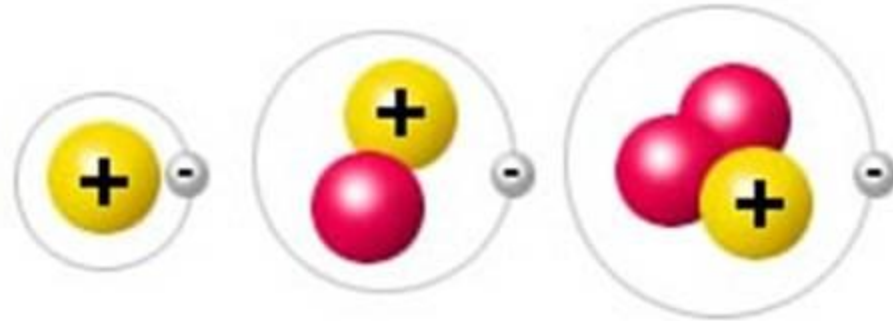
Типы радиоактивных распадов



Частица	Что это?	Как защититься?
α	$2n + 2p =$ ядро гелия	Лист бумаги
β^- / β^+	Электрон / позитрон	Алюминий (~ мм)
γ	Электромагнитное излучение	Свинец (~ см)

Изотопы

Изотопы – атомы одного элемента с разным весом



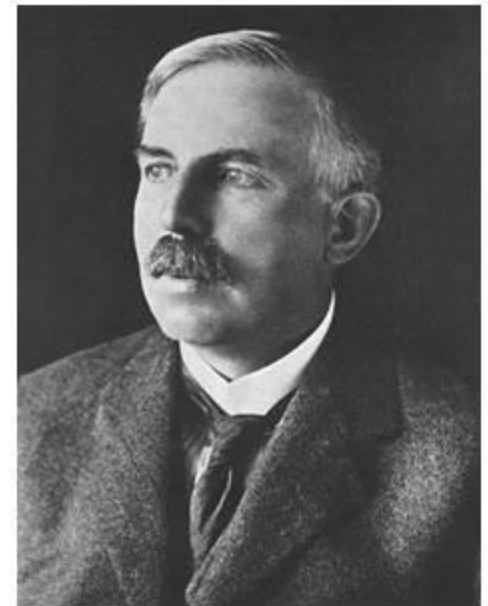
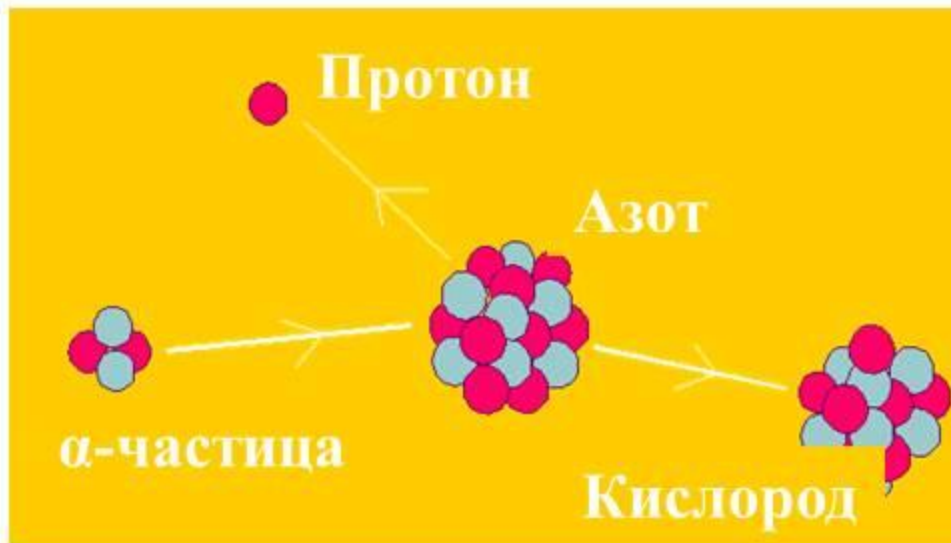
протий дейтерий тритий

- ✓ Дейтерий встречается в природе (доля в воде 1 / 8000)
- ✓ **Тяжелая вода (D_2O)** – вода с высокой долей дейтерия
- ✓ Выделение D_2O – сложный процесс, к которому прибегают из-за замечательных ядерных свойств дейтерия: хорошо замедляет нейтроны, слабо поглощает их
- ✓ Контроль D_2O в рамках режима нераспространения подобно ЯМ, используемым для производства ЯО

Ядерная реакция

Ядерная реакция – процесс образования **новых** ядер или частиц при столкновении ядер или частиц

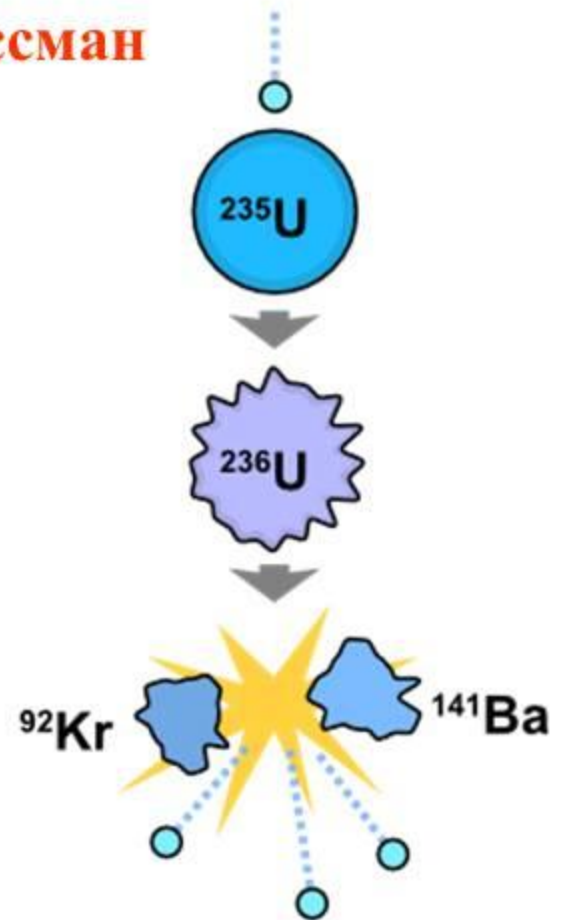
1919: Английский физик **Э. Резерфорд** проводит опыт по облучению атомов азота α -частицами
✓ первая в мире искусственная ядерная реакция



Деление тяжелых ядер

Реакция деления – процесс, при котором нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс

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



Физика процесса деления

1) Поглотив лишний нейтрон, ядро атома возбуждается и деформируется, приобретая вытянутую форму

2) В ядре действуют две силы:

электростатические (отталкивают) и ядерные (притягивают).

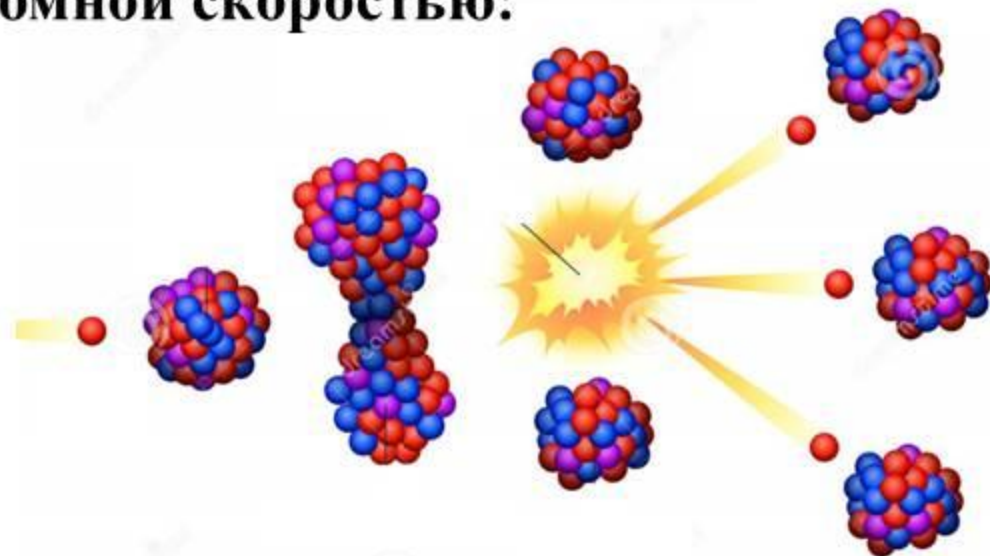
Но ядерные силы – короткодействующие

и в вытянутом ядре не могут удерживать удаленные части

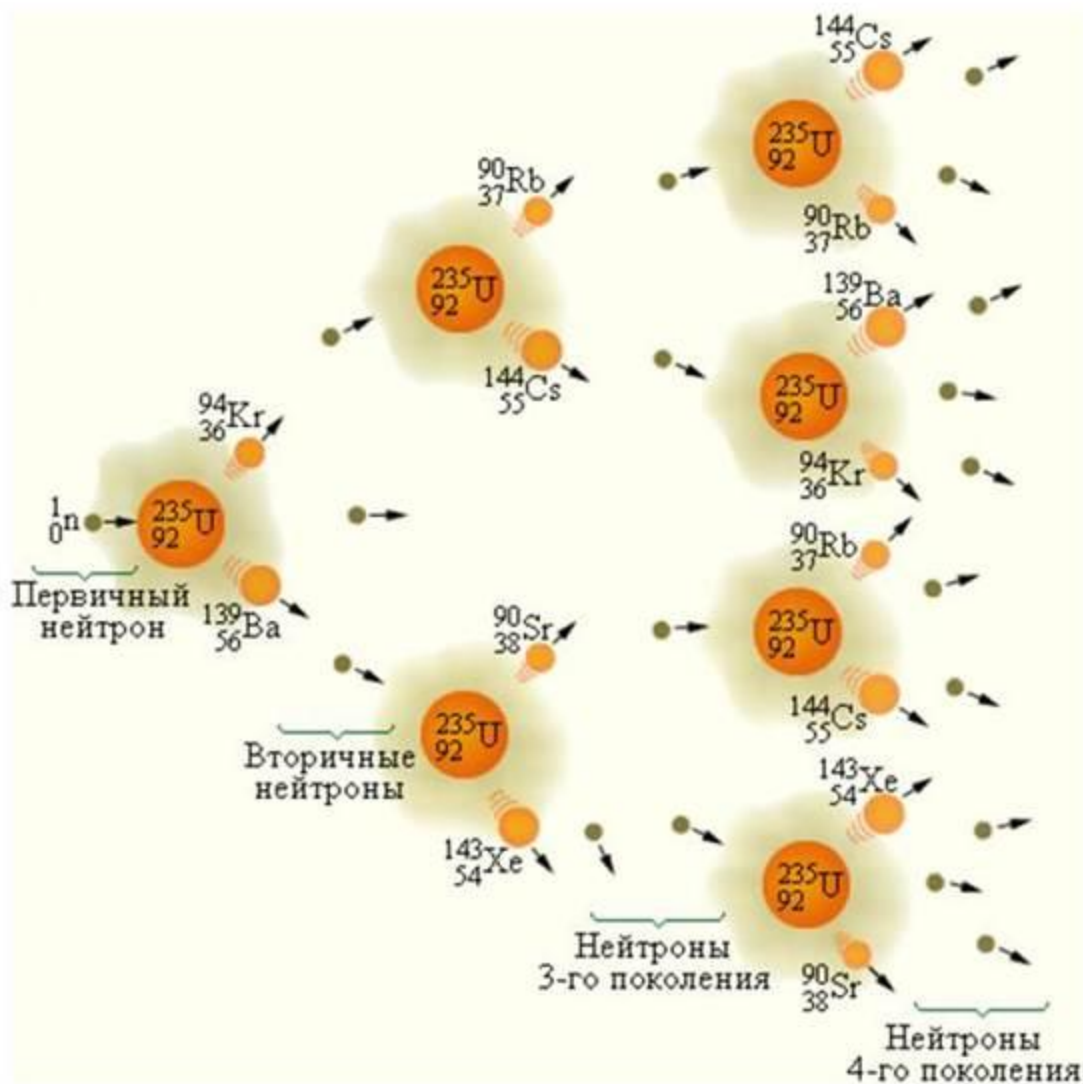
3) Электростатические силы разрывают ядро на две части, которые разлетаются с огромной скоростью:

выделяется 2-3 нейтрона

и огромная энергия



Цепная реакция деления



При делении ядра ^{235}U
(нужен 1 нейтрон)
освобождается
2 или 3 нейтрона

При благоприятных
условиях эти нейтроны
могут попасть
в другие ядра урана и
вызвать их деление

Такой лавинообразный
процесс называется
цепной реакцией деления

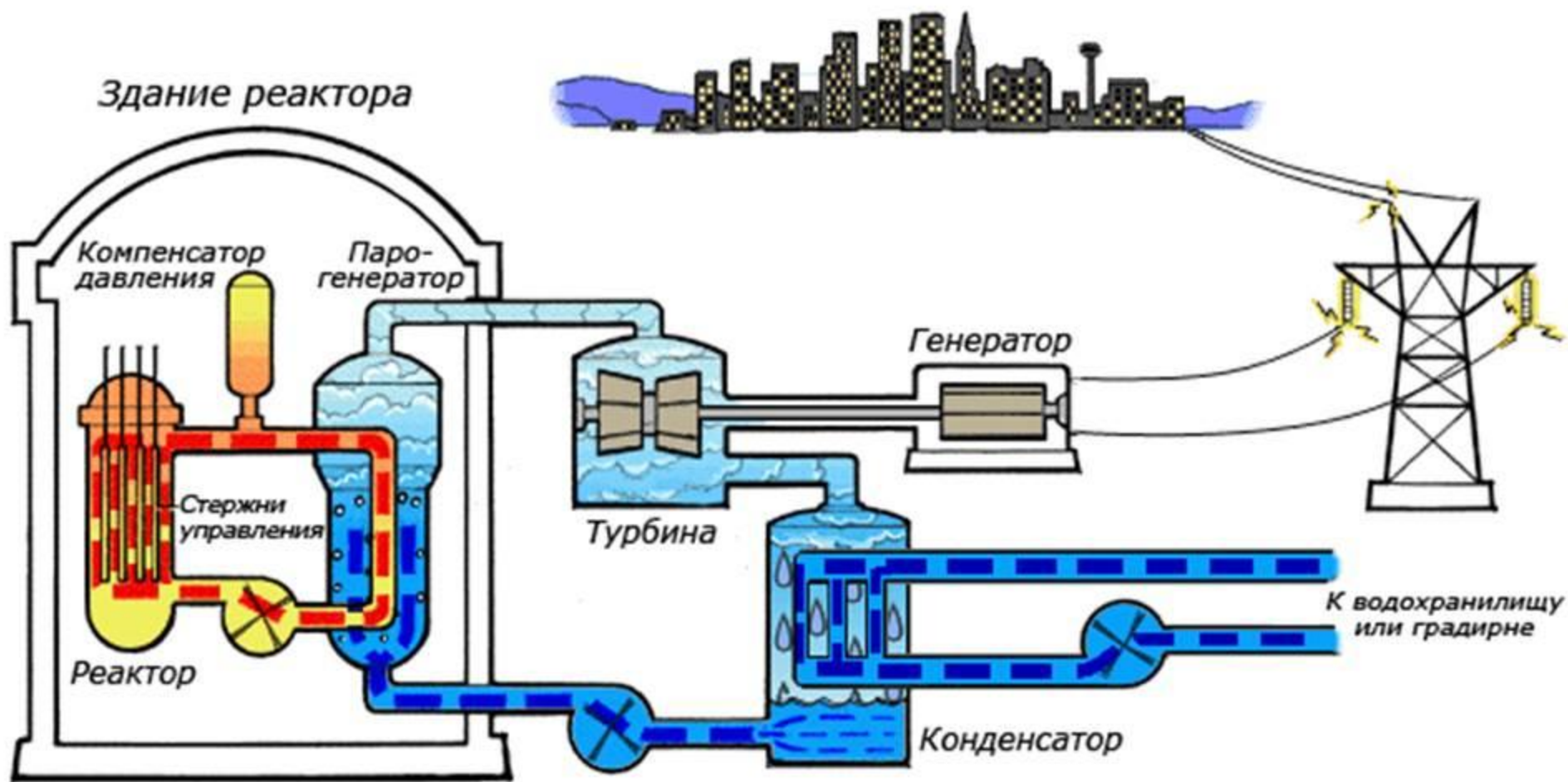
Ядерный реактор

Ядерный реактор – устройство, в котором поддерживается управляемая цепная реакция деления, сопровождающаяся выделением энергии

1 грамм урана = 2.5 тонны нефти



Атомная электростанция



Применение цепной реакции деления



Энергетика



Военная сфера

2

Ядерное оружие



Ядерное оружие

Ядерное оружие (ЯО) – предназначенное для военных целей ядерное устройство с неконтролируемым выделением энергии, получаемой при делении или синтезе

Атомное оружие – ЯО на основе реакции деления

Термоядерное (водородное) оружие – ЯО на основе реакции синтеза

Почему “водородное”: в силу электростатического отталкивания к слиянию способны ядра легких элементов с наименьшими зарядами (изотопы водорода D и T)

Почему “термоядерное”: высокая температура среды

Мощность термоядерного оружия в 6-8 раз выше атомного

Особенности ЯО

- ✓ огромная мощность: 1 кг урана \approx 1 000 000 кг ТНТ
- ✓ среди поражающих факторов – радиация

Критическая масса

Критическая масса – минимальная масса, в которой возможно протекание самоподдерживающейся цепной реакции деления



50 кг



10 кг

Факторы, влияющие на критическую массу

- ✓ форма
- ✓ плотность ($\sim 1 / \rho^2$)
- ✓ наличие отражателя (уменьшается при его наличии)



При какой форме критическая масса минимальна?

Торий

Торий – 90 элемент таблицы Менделеева

Природный торий: **100% ^{232}Th**

В природе тория в 3 раза больше, чем урана



Почему торий не используется в ядерной энергетике?



Можно ли сделать ЯО на основе тория?

Уран

Уран – 92 элемент таблицы Менделеева

Природный уран: **99.3%** ^{238}U + **0.7%** ^{235}U

^{235}U – делящийся материал

^{238}U – воспроизводящий материал

Обогащение по ^{235}U – доля ^{235}U во всем уране

Обедненный уран	< 0.7%
Природный уран	0.7%
Большинство АЭС	3-5%
Высокообогащенный уран (ВОУ)	> 20%
Оружейный уран	> 93%

Плутоний

Плутоний – 94 элемент таблицы Менделеева

В природе не встречается

Нарабатывается в реакторе

В 1 тонне ОЯТ реактора типа ВВЭР (3 года работы) 9 кг Pu:

0.2 кг ^{238}Pu 5.3 кг ^{239}Pu 2.2 кг ^{240}Pu 0.9 кг ^{241}Pu 0.4 кг ^{242}Pu

^{239}Pu , ^{241}Pu – делящийся материал

^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu – воспроизводящий материал

Возможно увеличить долю ^{239}Pu за счет короткой кампании

- ✓ выделение Pu из ОЯТ проще обогащения U
- ✓ с точки зрения распространения Pu опаснее U
- ✓ поэтому первое ЯО многих стран – на основе Pu

Значимое количество и материал прямого использования

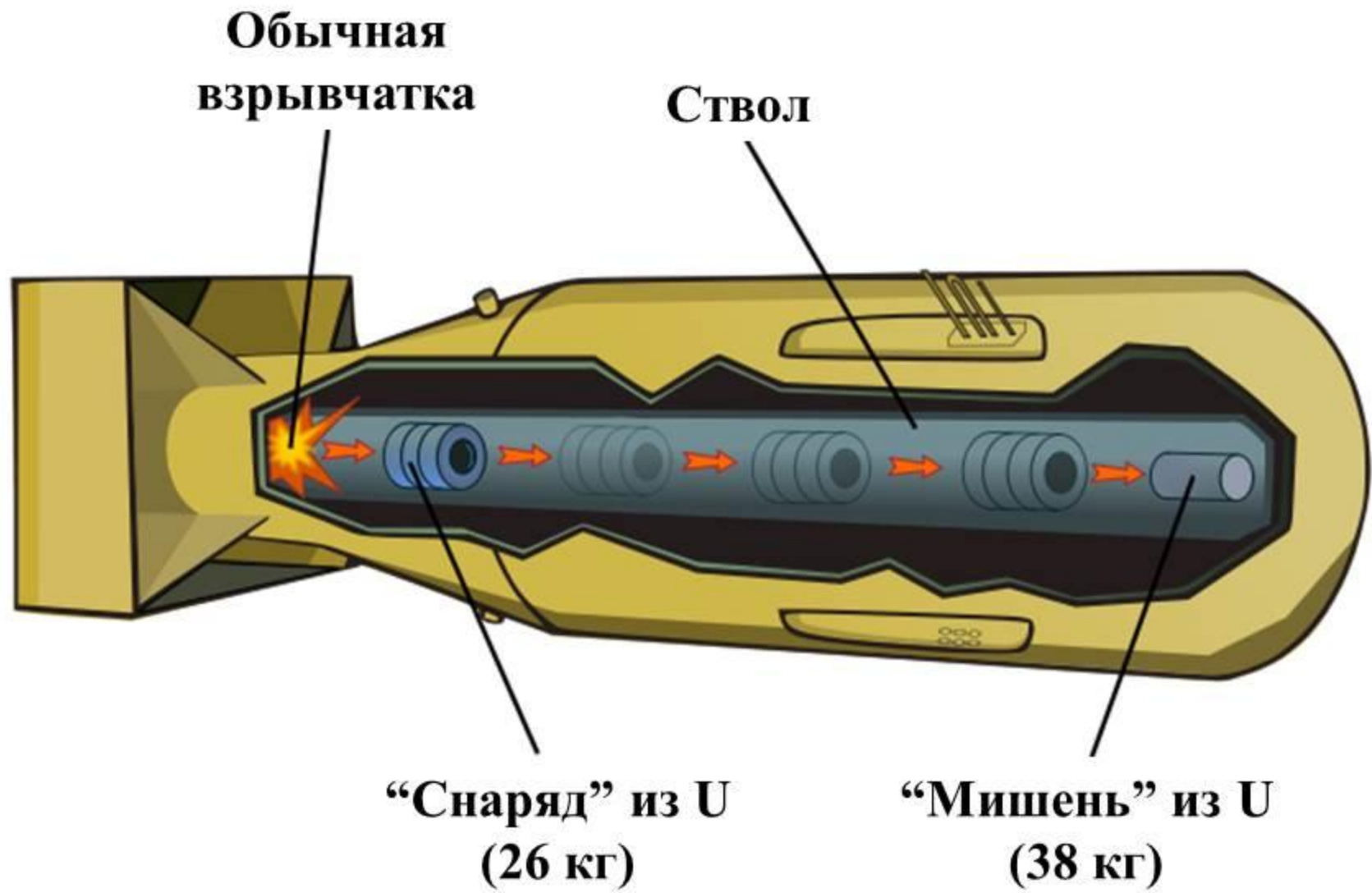
Значимое количество ЯМ – то количество ЯМ, которого достаточно для изготовления ЯО

- ✓ 25 кг ^{235}U
- ✓ 8 кг ^{239}Pu
- ✓ для еще более тяжелых элементов значительное ниже

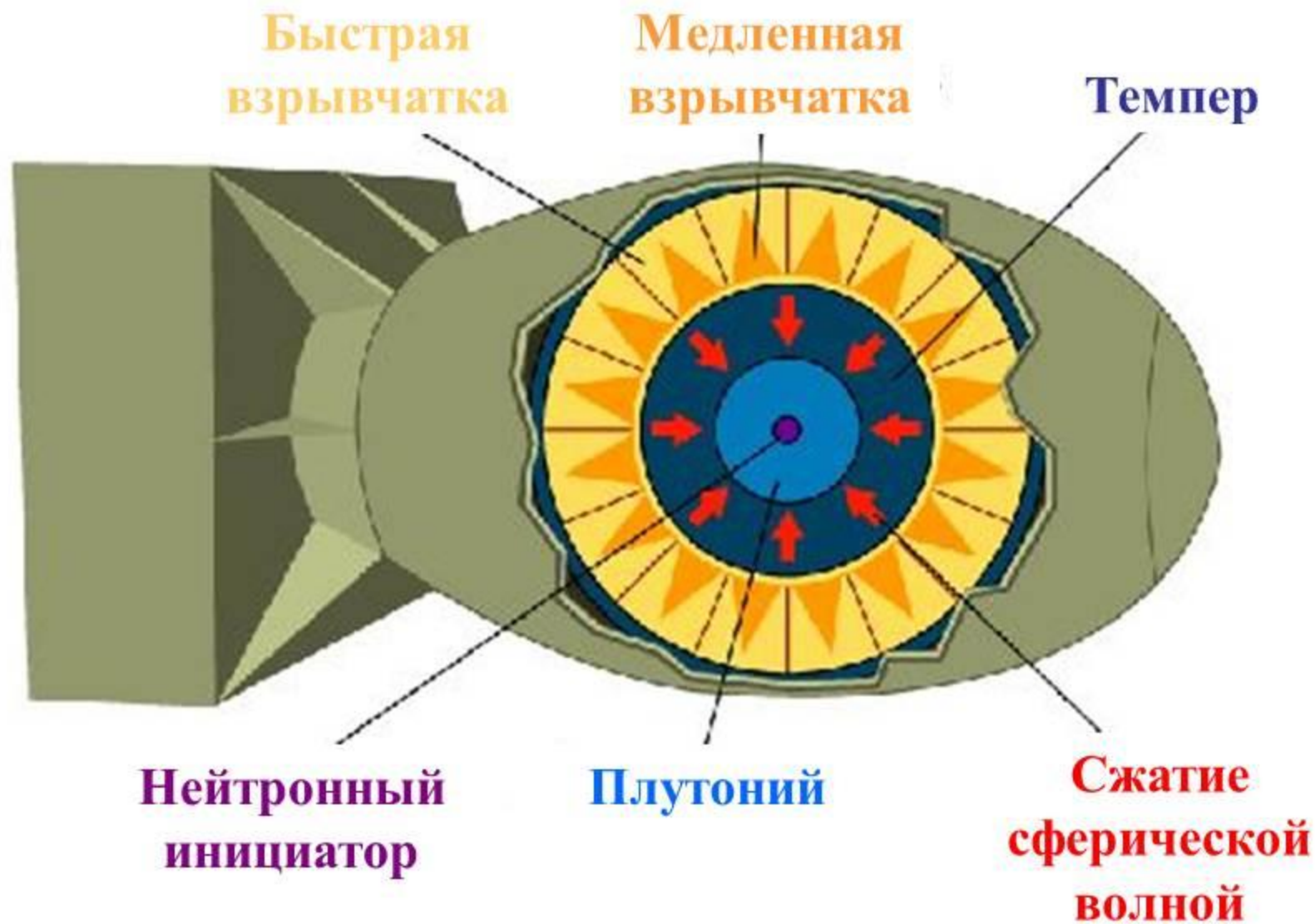
Материал прямого использования – материал, состав которого подходит для изготовления ЯО

- ✓ уран > 20% ^{235}U
- ✓ уран > 12% ^{233}U
- ✓ плутоний < 80% ^{238}Pu

ЯО ствольного типа (Little Boy, 1945)



ЯО имплозивного типа (Fat Man, 1945)



3

Ядерный топливный цикл



Ядерный топливный цикл (ЯТЦ)



Открытый ЯТЦ: ОЯТ = отходы → окончательное захоронение

Замкнутый ЯТЦ: ОЯТ = топливо → переработка

Чувствительные фазы ЯТЦ

Обогащение: урановый путь создания ЯО (все еще секретно)

- ✓ уменьшение критической массы
- ✓ делает материал привлекательнее для военных целей



Переработка: плутониевый путь создания ЯО (несекретно)

- ✓ плутоний отделяется от других материалов
- ✓ для создания ЯО построены военные реакторы, нарабатывающие оружейный плутоний
- ✓ но ЯО может быть создано на основе реакторного плутония (США испытали такое ЯО в 1962 году)



Ядерные реакторы с точки зрения нераспространения

В отличие от военных реакторов, остальные реакторы официально не для решения военных проблем. **Но даже мирные реакторы можно использовать для получения Pu.**

CANDU: $U_{\text{прир}} + D_2O$ (Канада)

✓ непрерывные перегрузки → топливо легко выгрузить, подобрать кампанию под требуемый изотопный состав Pu

Magnox: $U_{\text{прир}} + C + CO_2 + Mg-Al$ сплав (Англия, 1956 – 2015)

✓ нет потребности в материалах, требующих дополнительных установок: не используется ни тяжелая вода, ни обогащенный U

Бридеры: быстрые реакторы с $K_B > 1$

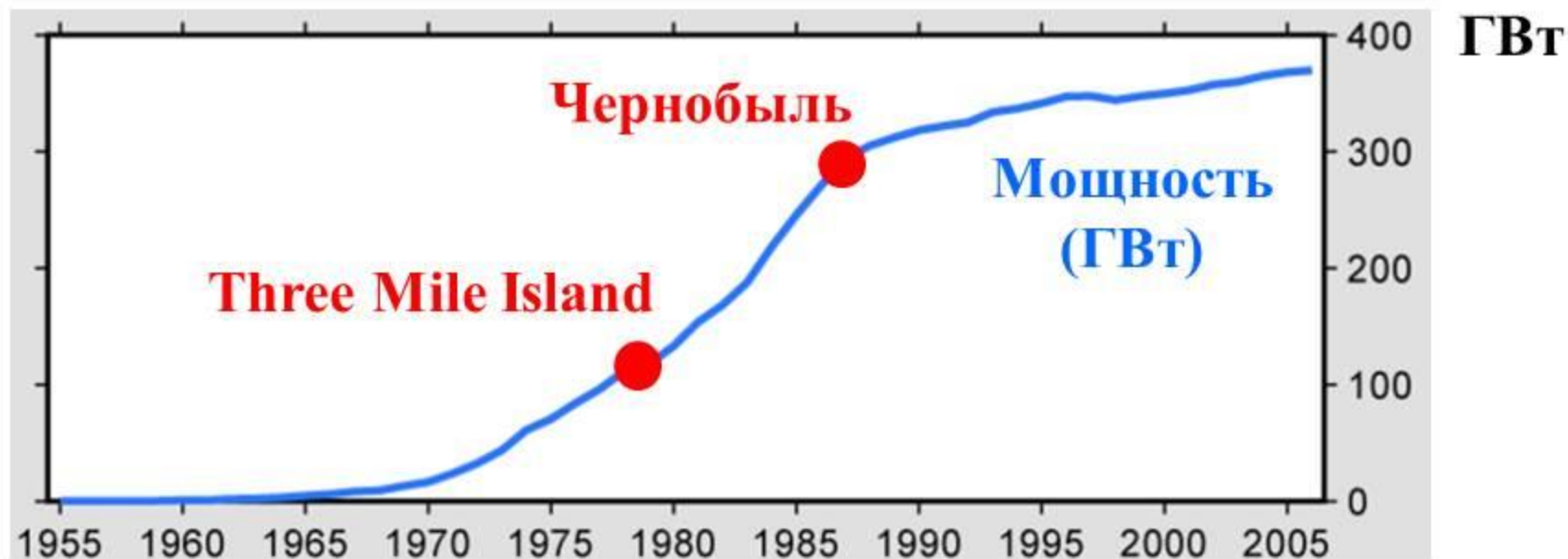
✓ наработка плутония

4

Нераспространение как необходимый элемент развития ЯЭ



Рост мощности ядерной энергетики



- ✓ быстрый начальный рост: 1 ГВт (1960) → 300 ГВт (1986)
- ✓ медленный рост после аварии в Чернобыле
- ✓ почти нет роста после аварии на Фукусиме
- ✓ спад роста обусловлен также экономическими причинами и проблемами нераспространения и захоронения отходов

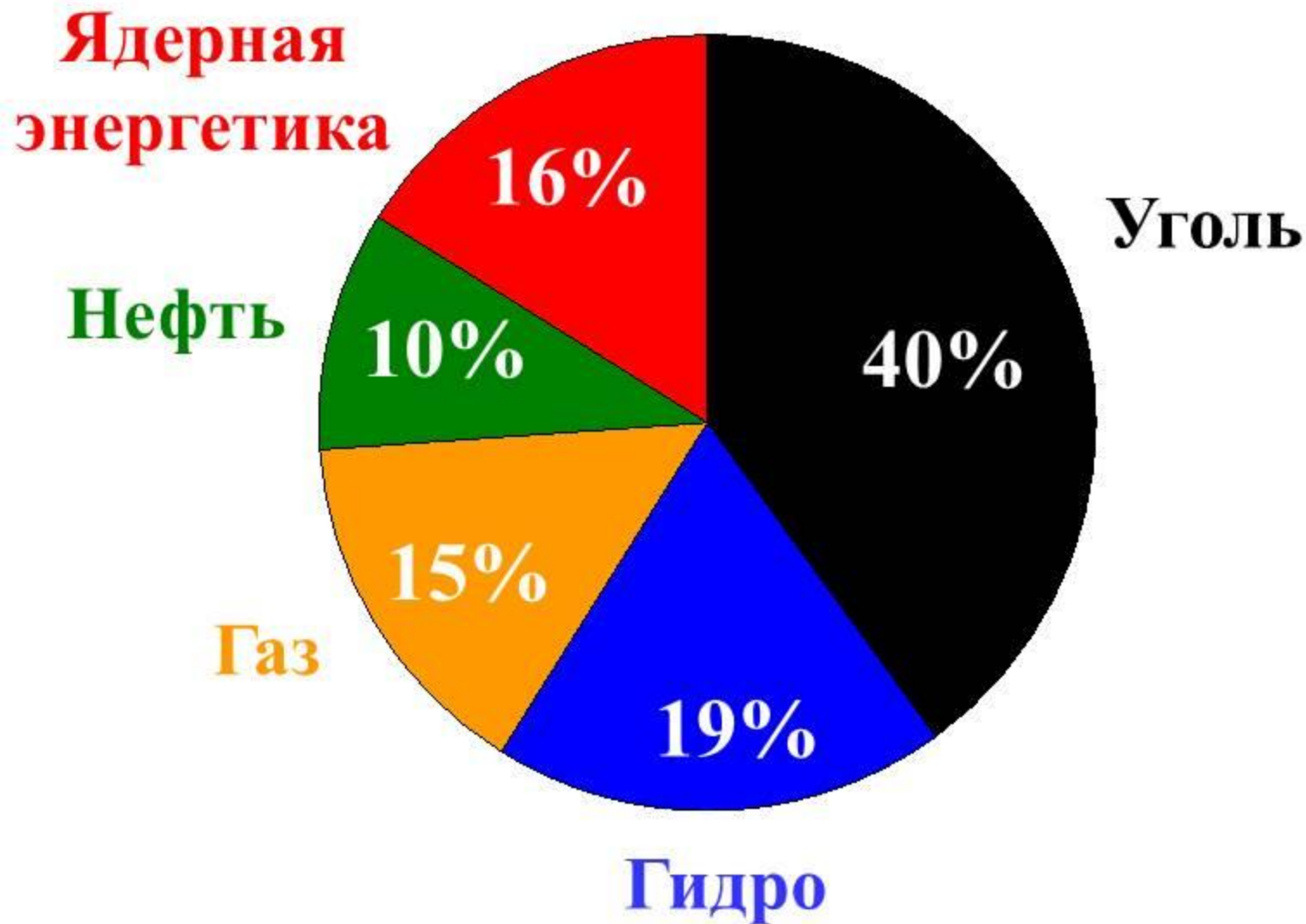
Современное состояние ядерной энергетики



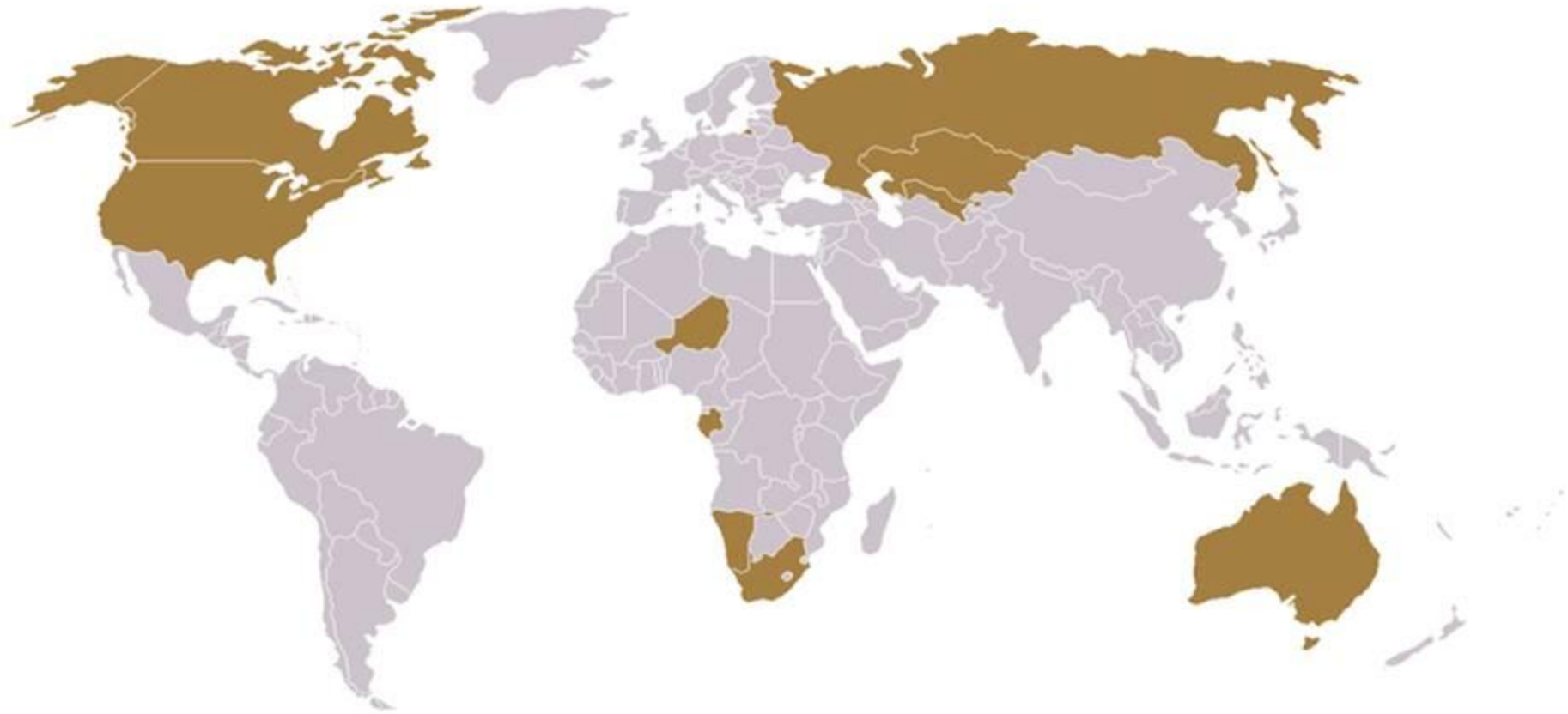
448 реакторов (392 ГВт)

<u>Страна</u>	<u>ГВт</u>	<u>%</u>
США	100	20
Франция	63	72
Япония	40	2
Китай	33	4
Россия	26	17
Южная Корея	23	30
Канада	14	16
Украина	13	52

Производство электроэнергии в мире



Запасы урана



Общие запасы урана в мире 6 млн. тонн (< 130 \$ / кг U)

Австралия 1.7 млн. тонн

Казахстан 0.7 млн. тонн

Россия 0.5 млн. тонн

Потребность 60 000 тонн, т.е. хватит на 100 лет

Поколения реакторов

Generation I

Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III

Advanced LWRs



- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

Near-Term Deployment

Generation III+ Evolutionary Designs Offering Improved Economics

.....

Generation IV

- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant

Gen I

Gen II

Gen III

Gen III+

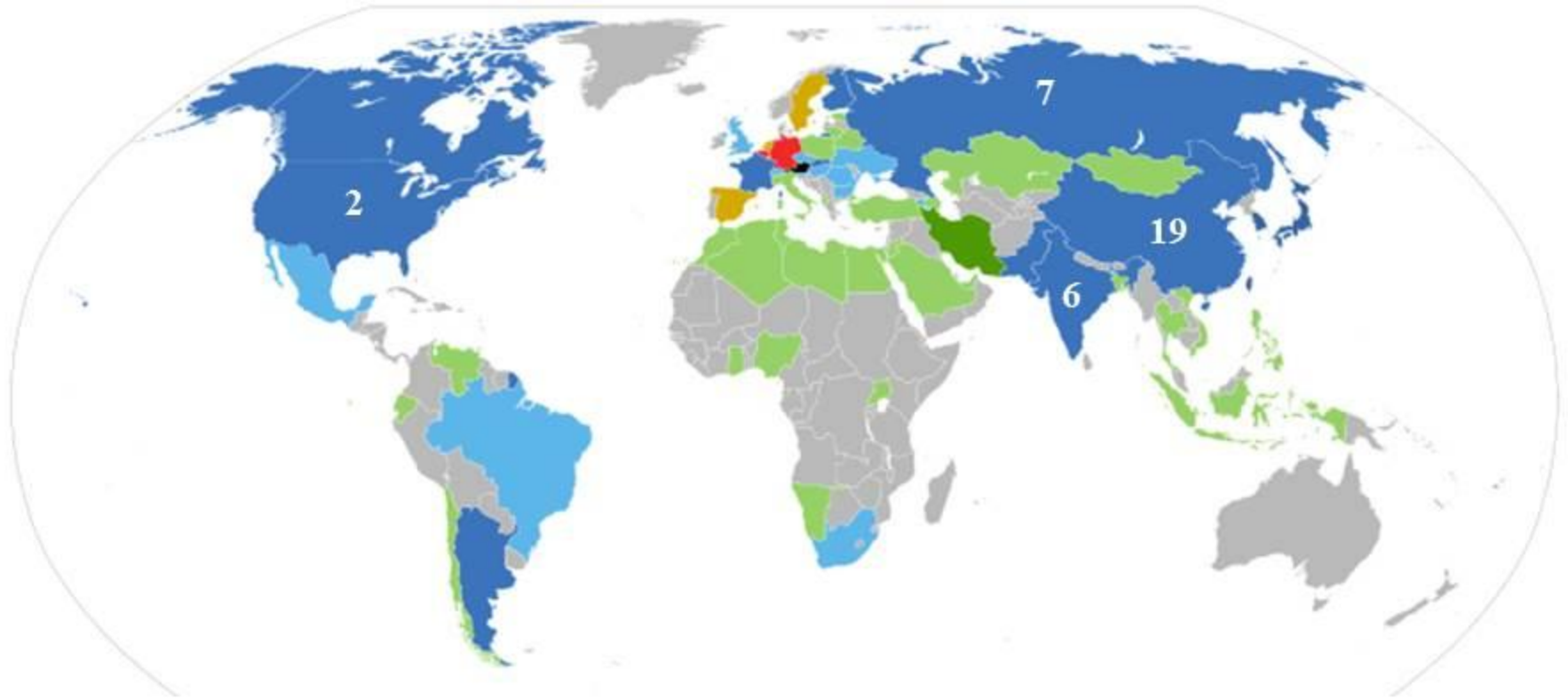
Gen IV

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030

Основные направления развития реакторов

- ✓ бридеры (нарабатывают новое топливо)
- ✓ повышение КПД ($> 33\%$)
- ✓ безопасность (вероятность тяжелых аварий $< 10^{-6}$ / год)

Строительство новых АЭС



Страны с АЭС

- строятся новые энергоблоки
- строительство планируется
- строительство не планируется
- рассматривается сокращение

Страны без АЭС

- станции строятся
- строительство планируется
- станций нет и не планируются
- ЯЭ запрещена законом

Предпосылки развития ядерной энергетики

- ✓ рост населения и потребления энергии на душу населения
- ✓ истощение запасов угля, нефти и газа
- ✓ экологические ограничения



Особенности ядерной энергетики

- ✓ почти неограниченная топливная база (замкнутый ЯТЦ)
- ✓ источник экологически чистой энергии (нет выброса CO₂)
- ✓ выработка электроэнергии, тепла и водорода

Безопасность – условие развития ЯЭ

Ядерная безопасность – свойство реактора и АЭС с определенной вероятностью предотвращать возникновение ядерной аварии, т.е. **конструкция реактора**

Физическая ядерная безопасность – сохранность ЯМ, т.е. **меры учета, контроля и физической защиты ЯМ**

Нераспространение – недопущение использования ядерных материалов и технологий для военных целей

Факторы, влияющие на риск распространения ЯО

Развитие ЯЭ связано с проблемами распространения

Увеличение масштаба ядерной энергетики

- ✓ рост числа АЭС (включая небольшие региональные АЭС)
- ✓ рост числа предприятий ЯТЦ и их спецификации
- ✓ увеличение количества транспортных потоков ЯМ
- ✓ увеличение объемов РАО

Структурные изменения в промышленном комплексе ЯЭ

- ✓ воспроизводство ядерного топлива (бридеры)
- ✓ замкнутый ЯТЦ (переработка ОЯТ)

Развитие ЯЭ в неядерных странах, которые исторически не готовы к использованию ядерной технологии