

# Физика ядерной энергетики. Ядерное оружие

A composite image of space. The foreground shows the curved horizon of the Earth with green oceans and brown landmasses. A bright sun is visible on the right side, casting a warm glow. In the background, a colorful galaxy or nebula is visible against the dark starry sky.

Некрасов К.А., УГТУ - УПИ

[900igr.net](http://900igr.net)

# СОДЕРЖАНИЕ

- Происхождение ядерной энергии
- Цепная реакция деления ядер
- Делящиеся изотопы
- Ядерный реактор и атомная бомба

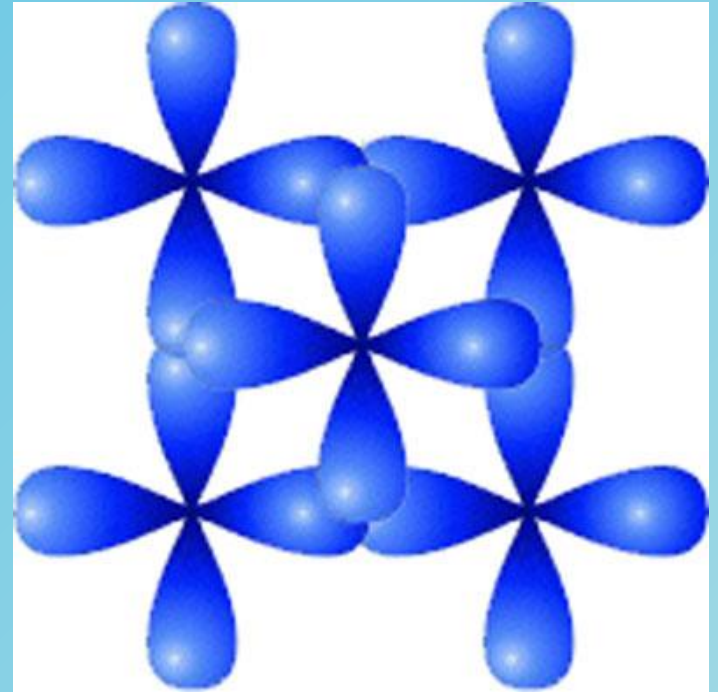
# Энергия в обычном мире



- Тепловая энергия движения молекулы при комнатной температуре составляет примерно 0.03 эВ.
- Потенциальная энергия атома урана в поле тяготения Земли на высоте 100 м равна 0.0024 эВ

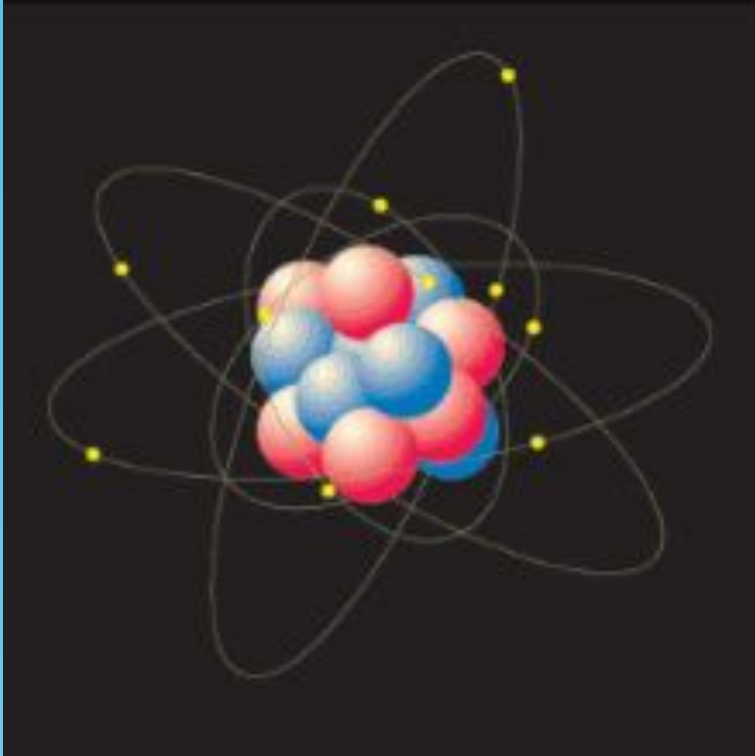
# Энергия химических связей

- Электронные оболочки атомов в молекулах и кристаллах связаны энергиями порядка 1 - 100 эВ на атом.



- Например, при полном сгорании углерода выделяется энергия, равная 4.08 эВ на один атом

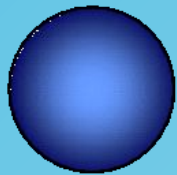
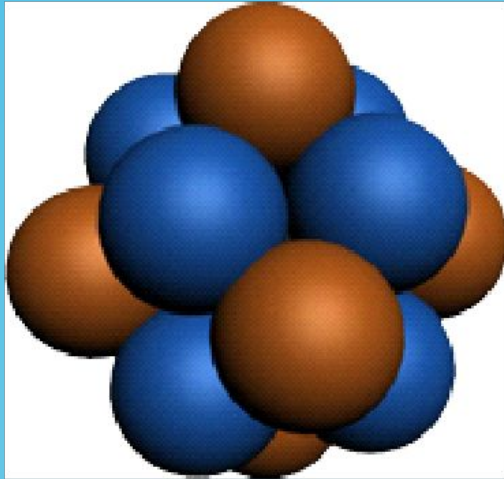
# Ядерная энергия



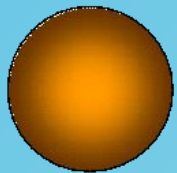
- О ядрах атомов и ядерной энергии до начала 20-го века не было даже известно.
- В 1896 году Анри Беккерелем была

обнаружена радиоактивность, а в 1909-1911 гг. Эрнст Резерфорд предположил и доказал существование атомного ядра

# Значение нейтрона



Протон



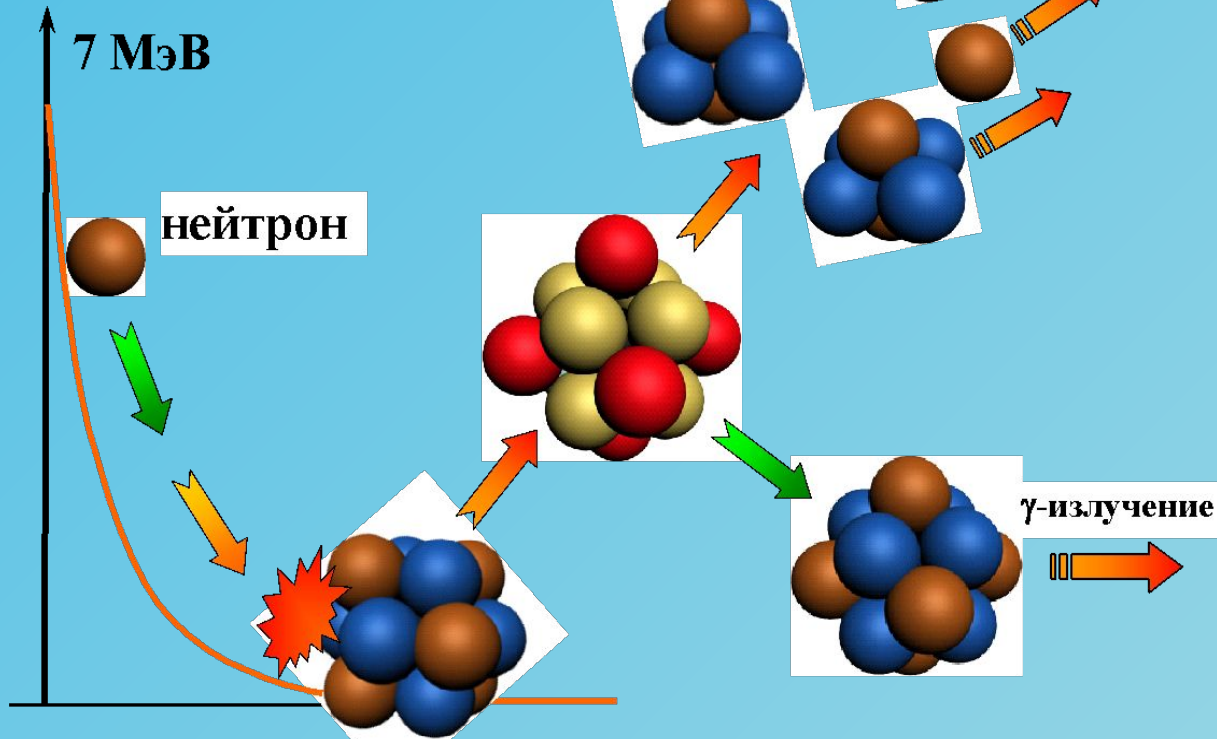
Нейтрон

- Развитие ядерной физики резко ускорилось в 1932 году, когда Джеймс Чедвик открыл нейтрон.
- Сразу после открытия нейтрона Дмитрий Иваненко и Вернер Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель атомного ядра, предсказывавшую, что в ядре содержится огромная энергия.

- Энергия связи ядра урана составляет  $7.6 \cdot 10^6$  эВ (7.6 МэВ) на протон или нейтрон

# Расщепление ядра

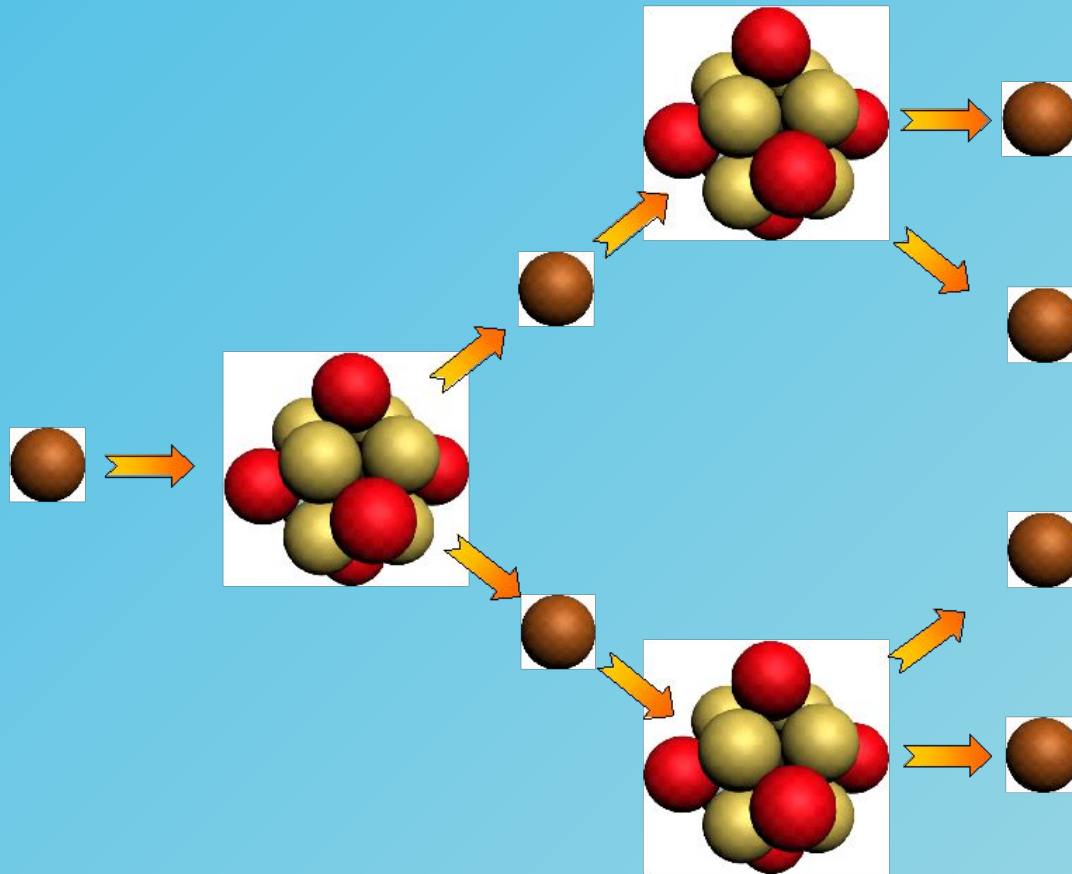
Столкновение  
нейтрона с ядром



- Поскольку нейтрон не заряжен, для сближения с ядром ему не нужна высокая скорость.

- В области действия ядерных сил ( $10^{-12}$  м), нейтрон «падает» на ядро. При этом выделяется энергия около 7 МэВ.

# Цепная реакция деления ядер

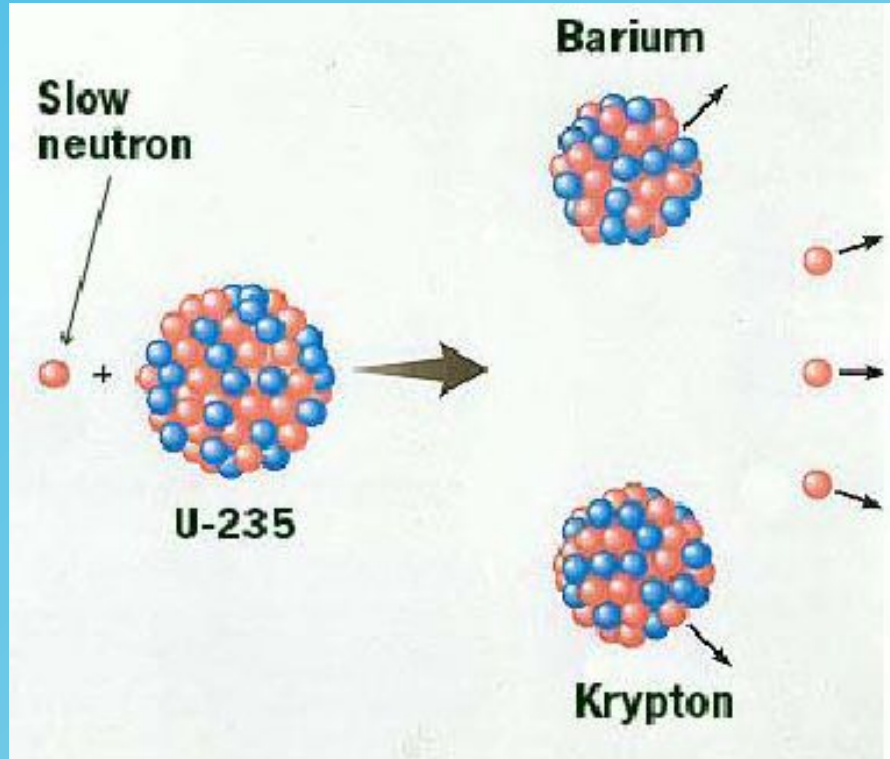


В 1934 году венгерский физик Лео Сциллард начал искать возможность высвобождения внутриядерной энергии в **цепной ядерной реакции** с участием нейтронов.

Для этого нейтрон должен выбивать из ядра два новых нейтрона, или больше.



# Деление ядра урана на два осколка



- В середине 1930-х никто, включая Сцилларда и Ферми, ещё не ожидал, что уран будет делиться нейтронами на два больших осколка.
  - В 1939 году Отто Ган и Фриц Штрассман обнаружили в облучённом нейтронами уране барий.
- Барий – примерно в 2 раза более лёгкий элемент, чем уран. Австрийские физики Лиза Мейтнер и Отто Фриш объяснили его появление делением ядер.

# Цепная реакция деления урана

- Были обнаружены и нейтроны, вылетающие из ядра после деления. Свои результаты практически одновременно, в марте 1939 г., опубликовали французский физик Фредерик Жолио-Кюри, а также Ферми и Сциллард. Получалось, что на одно поглощение нейтрона ядром урана приходится (в среднем) примерно 2 новых нейтрона. Цепная реакция деления ядер урана оказалась возможной!

# Изотопы природного урана

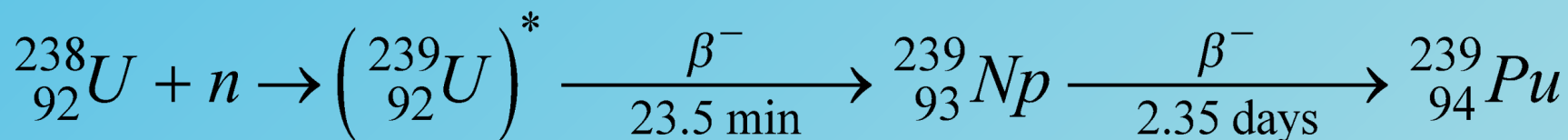
Оказалось, что основной изотоп урана  $^{238}\text{U}$  делится только очень быстрыми нейтронами ( $E_{\text{кин}} \geq 1.2 \text{ МэВ}$ ), и только изотоп  $^{235}\text{U}$  делится нейтронами любых энергий. Природный же уран состоит из трёх изотопов со следующими характеристиками.

## Изотопный состав природного урана

Изотоп	Содержание	Период полураспада $T_{1/2}$
$^{238}\text{U}$	99.2831 %	$4.5 \cdot 10^9$ лет
$^{235}\text{U}$	0.7115 %	$7.1 \cdot 10^8$ лет
$^{234}\text{U}$	0.0054 %	$2.5 \cdot 10^5$ лет

# Плутоний и другие трансурановые элементы

- Ещё Ферми и Сциллард ожидали, что ядро урана может поглощать нейтроны с образованием новых элементов. В 1941 году Гленн Сиборг (Glenn Seaborg) синтезировал плутоний по реакции



- Им же затем были получены и другие трансурановые элементы, вплоть до 102 номера таблицы Менделеева.
- Большинство из этих элементов, как уран - 235, легко делится нейтронами, так что могут служить ядерным горючим.

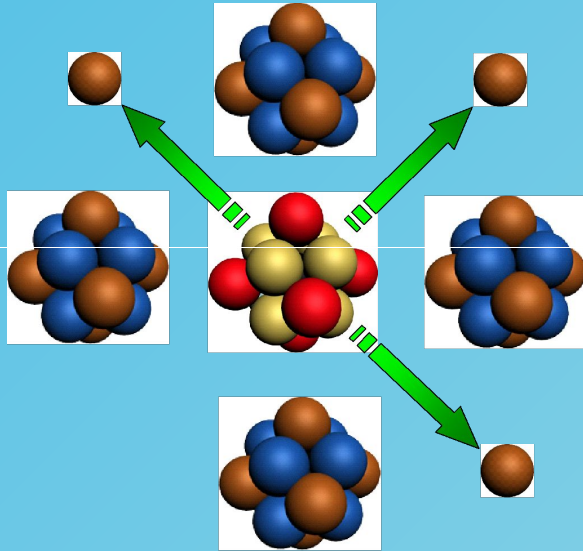
# Делящиеся изотопы

Изотоп	Критический диаметр, см	Критическая масса, кг	Нейтроны $\nu$ , $\nu/(\text{г}\cdot\text{с})$
$^{232}\text{U}$	10.9	13	
$^{233}\text{U}$	11.3	14.4	0.0009
$^{234}\text{U}$	21.7	102	
$^{235}\text{U}$	16.9	48	0.0003
$^{238}\text{Pu}$	9.29	8.2	2600
$^{239}\text{Pu}$	10.0	10.3	0.02
$^{240}\text{Pu}$	14.9	34	900
$^{241}\text{Pu}$	10.7	12.4	0.05
$^{242}\text{Pu}$	18.9	70	1700
$^{237}\text{Np}$	19.4	78	
$^{241}\text{Am}$	22.0	75	1.2
$^{242}\text{Am}$	12.2	12.8	150
$^{243}\text{Am}$	34.3	284	0.07
$^{243}\text{Cm}$	11.2	9.9	100
$^{244}\text{Cm}$	16.2	30	$10^7$
$^{245}\text{Cm}$	12.3	13	110

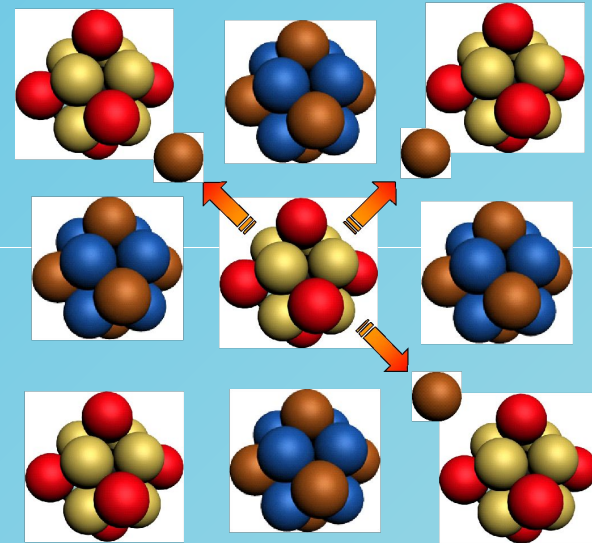
# Делящиеся изотопы

Изотоп	Тип распада	Период полу-распада, годы	Энергия распада, Вт/кг
$^{232}\text{U}$	$\alpha$ -распад	68.9	$\geq 740$
$^{233}\text{U}$	$\alpha$ -распад	$1.6 \cdot 10^5$	0.3
$^{234}\text{U}$	$\alpha$ -распад	$2.5 \cdot 10^5$	$\sim 0.2$
$^{235}\text{U}$	$\alpha$ -распад	$7.0 \cdot 10^8$	0.0001
$^{238}\text{Pu}$	$\alpha$ -распад	87	570
$^{239}\text{Pu}$	$\alpha$ -распад	$2.4 \cdot 10^4$	1.9
$^{240}\text{Pu}$	$\alpha$ -распад	$6.6 \cdot 10^3$	6.8
$^{241}\text{Pu}$	$\beta$ -распад	14.4	4.2
$^{242}\text{Pu}$	$\alpha$ -распад	$3.7 \cdot 10^5$	0.1
$^{237}\text{Np}$	$\alpha$ -распад	$2.1 \cdot 10^6$	$\sim 0.02$
$^{241}\text{Am}$	$\beta$ -распад	432.2	114
$^{242}\text{Am}$	$\gamma$ -распад	141	
$^{243}\text{Am}$	$\beta$ -распад	7370	6.3
$^{243}\text{Cm}$	$\alpha$ -распад	29.1	1800
$^{244}\text{Cm}$	$\alpha$ -распад	18.4	2800
$^{245}\text{Cm}$	$\alpha$ -распад	8500	5.7

# Критические масса и радиус



- Утечка нейтронов

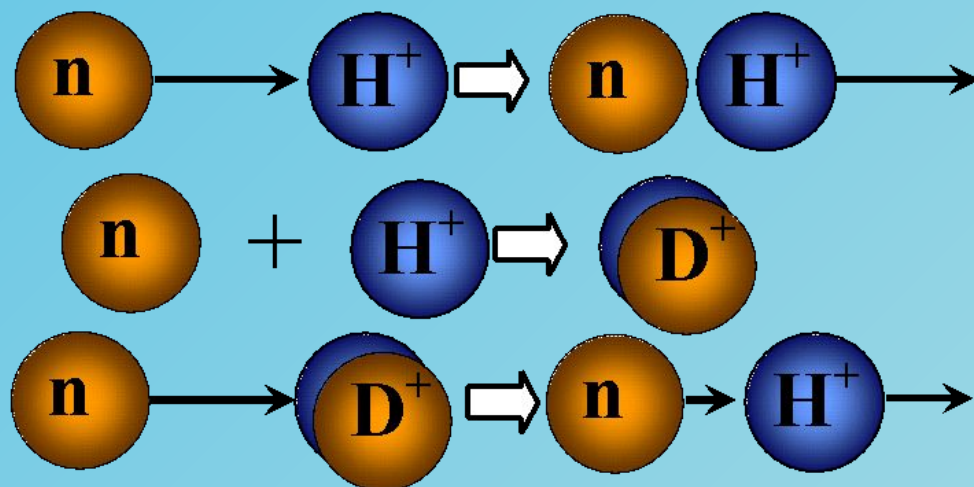


- Цепная реакция

- Длина свободного пробега нейтронов между столкновениями огромна, она составляет несколько сантиметров. В малых количествах делящегося вещества утечка нейтронов останавливает цепную реакцию. Для поддержания реакции необходимы препятствующие утечке критический радиус и соответствующая критическая масса вещества.

# Реактор на природном уране

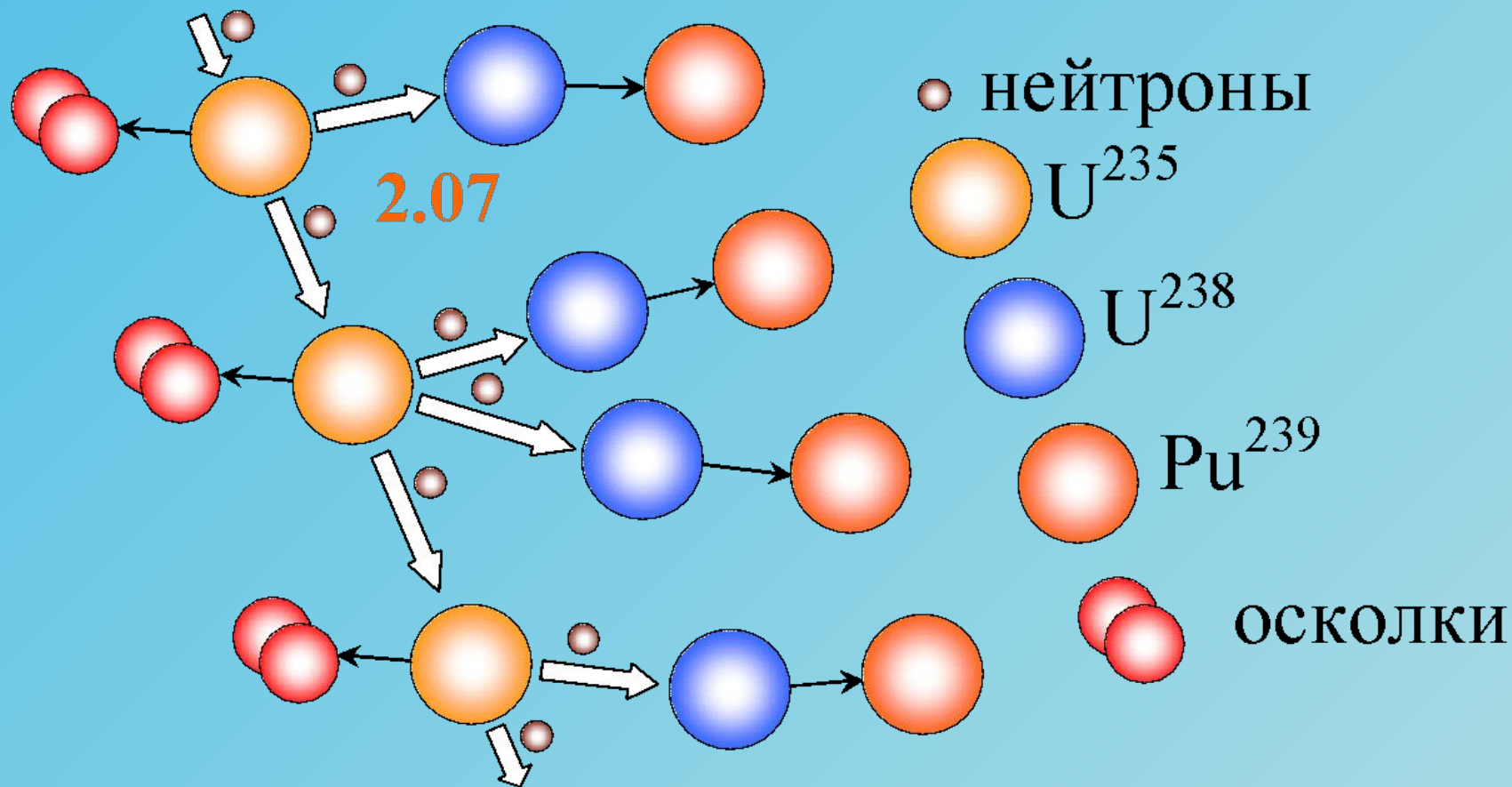
Ферми и Сциллард, работавшие в Колумбийском университете, надеялись осуществить цепную реакцию деления ядер на природном уране. Для этого вероятность деления нужно повысить быстрым замедлением нейтронов до комнатной температуры.



В качестве замедлителя подходит тяжелая вода  $D_2O$ , практически не поглощающая нейтроны.



# НАРАБОТКА ПЛУТОНИЯ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

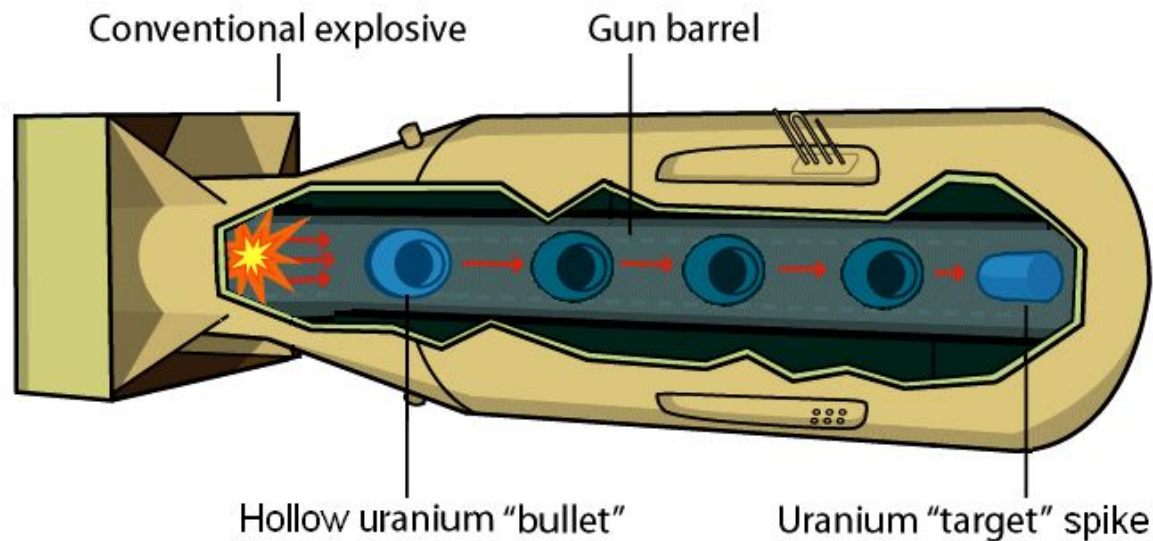


# Структура ядерного реактора



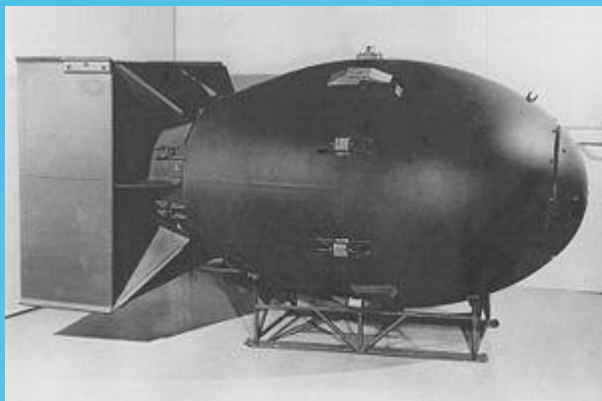
отражатель нейтронов  
(графит, бериллий)

# Атомная бомба пушечного типа. Соединение подкритических частей

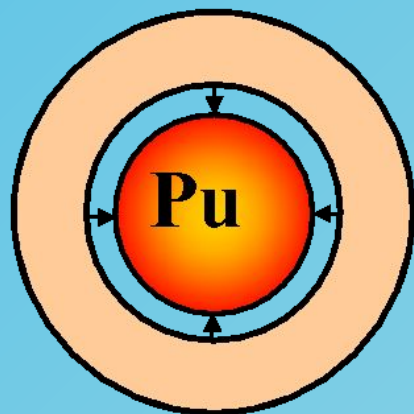


Длина: 3.05 м;  
Диаметр: 0.76 м;  
Полная масса: 3.6 тонны;  
Масса ядерного заряда: 42 кг, обычного заряда (TNT) – 900 кг.  
Энергия взрыва: 12-15 КИЛОТОНН.

Схема атомной бомбы пушечного типа Little boy. «Пуля» из  $^{235}\text{U}$  подкритической массы выстреливается направленным взрывом и встречается с мишенью – также подкритической массой  $^{235}\text{U}$ . Вместе они образуют надкритическую массу, которая и взрывается. Для удержания критической массы в компактном состоянии используется оболочка из тяжелого металла.



# Бомба имплозивного типа . Сжатие обычным взрывом



Обычная взрывчатка

Характеристики бомбы:

Диаметр: 1.5 м;

Масса: 4.5 тонны;

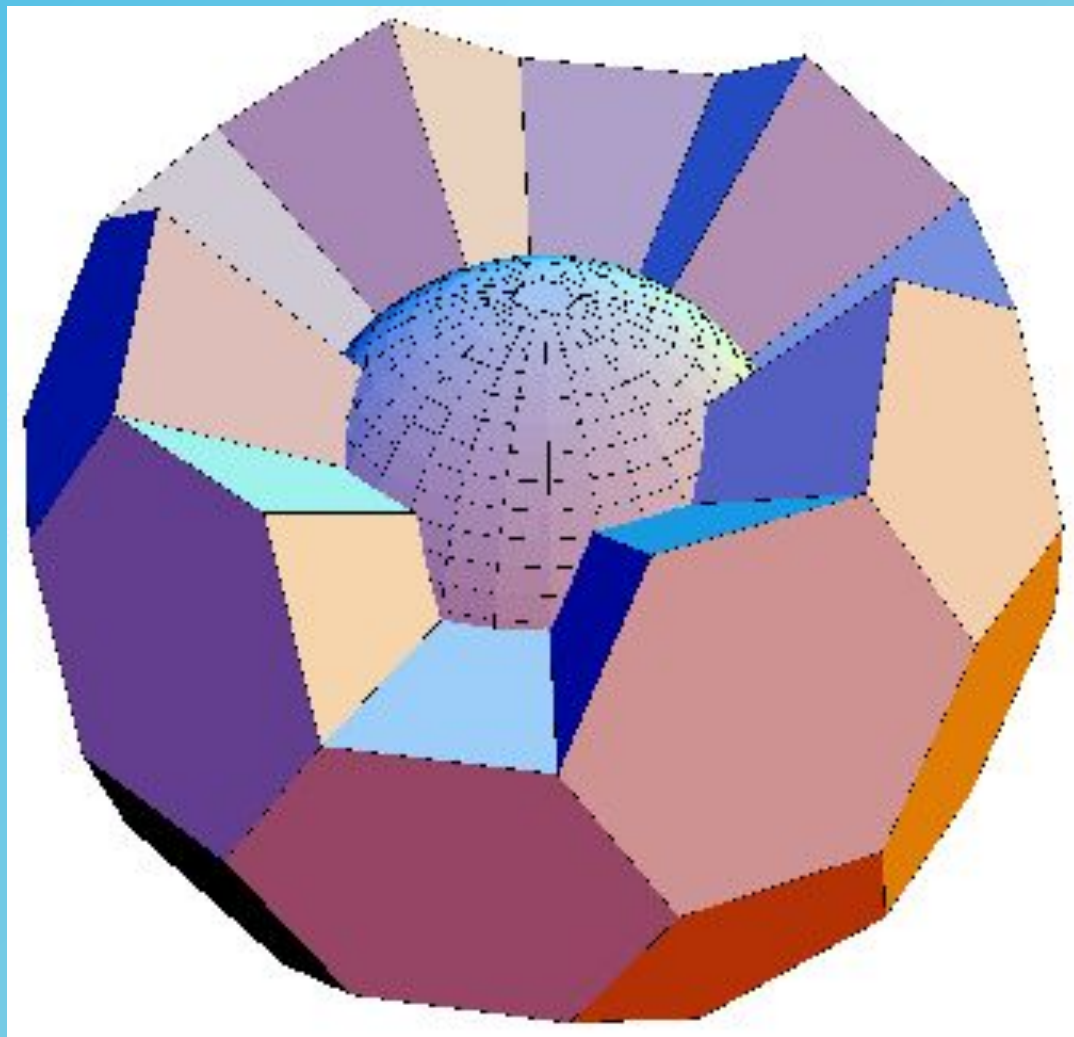
Ядерный заряд: 6 кг;

Энергия взрыва: 20

килотонн.

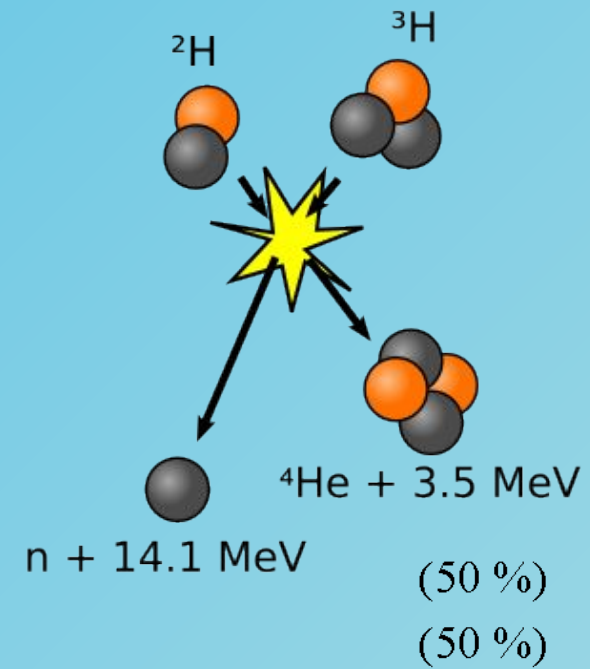
Схема бомбы имплозивного типа Fat Man. Надкритическое состояние ядерного заряда достигается его сильным сжатием посредством сферически симметричного взрыва, направленного к центру.

# Бомба имплозивного типа. Сжимающий взрыв, направленный в центр



Взрыв, направленный точно в центр, обеспечивается сложной комбинацией «линз» из быстрой и медленной взрывчатки

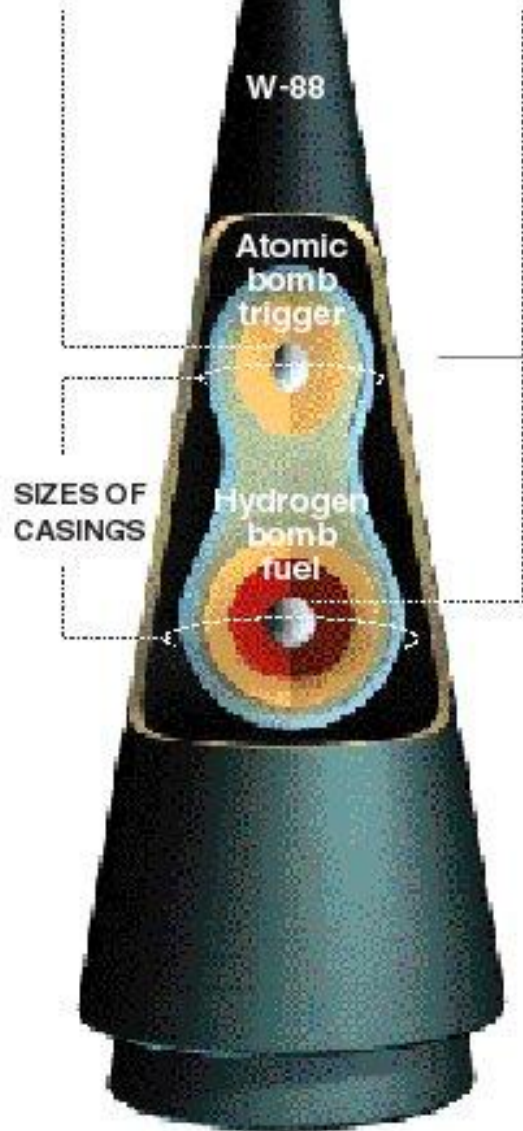
# Термоядерные реакции



- (1)  $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} (5.5 \text{ MeV}) + \text{n} (14.1 \text{ MeV})$
- (2)  $\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} (1.01 \text{ MeV}) + \text{p} (3.02 \text{ MeV})$
- (3)  $\quad \quad \quad \rightarrow {}^3\text{He} (0.82 \text{ MeV}) + \text{n} (2.45 \text{ MeV})$
- (4)  $\text{D} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} (3.6 \text{ MeV}) + \text{p} (14.7 \text{ MeV})$
- (5)  $\text{T} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \text{n} + 11.3 \text{ MeV}$
- (6)  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \text{p}$
- (7)  ${}^3\text{He} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + \text{n} + 12.1 \text{ MeV}$  (51 %)
- (8)  $\quad \quad \quad \rightarrow {}^4\text{He} (4.8 \text{ MeV}) + \text{D} (9.5 \text{ MeV})$  (43 %)
- (9)  $\quad \quad \quad \rightarrow {}^4\text{He} (0.5 \text{ MeV}) + \text{n} (1.9 \text{ MeV}) + \text{p} (11.9 \text{ MeV})$  (6 %)
- (10)  $\text{D} + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + 22.4 \text{ MeV}$  -
- (11)  $\text{p} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} (1.7 \text{ MeV}) + {}^3\text{He} (2.3 \text{ MeV})$  -
- (12)  ${}^3\text{He} + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + \text{p} + 16.9 \text{ MeV}$
- (13)  $\text{p} + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + 8.7 \text{ MeV}$

SHAPE OF  
ATOMIC BOMB  
TRIGGER  
Described as  
not spherical

SHAPE OF  
HYDROGEN  
BOMB FUEL  
Described as  
spherical



BOMB PLACEMENT  
Atomic bomb trigger is placed  
above the hydrogen bomb fuel

The New York Times;  
Illustration by Mika Grondahl

# Термо- ядерный заряд

В качестве  
термоядерного  
заряда  
используют  
газовую смесь  
дейтерия ( $D \equiv 2H$ )  
и трития ( $T \equiv 3H$ ):  
 $D + T \rightarrow 4He + n$   
 $+ 17.6 \text{ МэВ}$

## Два пути создания атомной бомбы

Одним из первых, в сентябре 1939 г., правильные пути к созданию ядерного оружия определил Вернер Гейзенберг, ставший одним из руководителей ядерной программы Германии. Он сформулировал два пути использования энергии деления:

- Отделение урана-235 от урана-238 для создания атомной бомбы.

- Создание «сжигателя» урана на медленных нейтронах. В качестве замедлителя предполагалось использовать тяжёлую воду  $D_2O$ , практически не поглощающую нейтроны.

В сентябре 1941 г. Гейзенберг понял и то, что

- Плутоний-239, нарабатываемый в «сжигателе» урана из  $^{238}U$ , тоже можно использовать для создания бомбы.



## **Английский проект создания урановой бомбы**

В конце 1939 г. Отто Фриш, эмигрировавший в Великобританию, понял, что на тепловых нейтронах и природном уране атомную бомбу сделать невозможно, поскольку цепная реакция если и будет развиваться, то слишком медленно.

Зато, Фриш с максимальной возможной тогда точностью рассчитал, что бомбу можно сделать на быстрых нейтронах из урана-235. Вместе с Рудольфом Пайерлсом, используя работу Бора, они получили следующие оценки характеристик бомбы:

- Время генерации нейтронного поколения на быстрых нейтронах будет в 1000 раз меньше, чем на тепловых;
- То есть, за несколько миллионных долей секунды (до начала испарения материала бомбы) в объёме урана возникнут 100 новых поколений нейтронов;
- Количество нейтронов при этом возрастёт примерно в  $2.5 \cdot 10^{11}$  раз;
- Температура внутри бомбы достигнет миллионов градусов;
- Для создания такой бомбы потребуется несколько килограммов урана-235, вместо нескольких десятков тонн природного урана для гипотетической бомбы на тепловых нейтронах.

## **Манхэттэнский проект**

Американская ядерная программа получила официальную поддержку Президента Рузвельта 11 октября 1939 г., после представления ему письма, подписанного Эйнштейном по просьбе венгерских физиков Еугена Вигнера, Эдварда Теллера и Лео Сцилларда в связи с угрозой разработки ядерного оружия в Германии.

В результате, был создан Урановый комитет. Этот комитет, однако, не получал финансирования, требовавшегося для успешной работы, поскольку возможность достаточно быстрого создания бомбы оставалась неопределённой.

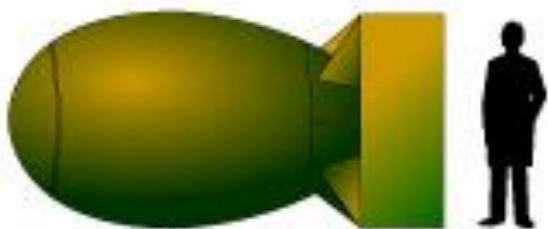
В начале 1941 г. Британия передаёт США свои разработки ядерной бомбы, которые доказывали реальность её создания и содержали конкретные рекомендации; 6 декабря 1941 г. начинается Манхэттэнский проект.

## АТОМНЫЙ ПРОЕКТ В СССР

- Ядерная физика развивалась с конца 1920-х годов;
- Сделаны такие открытия, как явление ядерной изомерии, спонтанное деление ядер, запаздывающие нейтроны, испускаемые осколками деления;
  - 28 сентября 1942 г. Сталин подписывает решение о возобновлении работ по проблеме урана в ЛФТИ;
  - В феврале 1943 г. принимается программа научных и технических исследований по практическому применению ядерной энергии, под руководством И.В. Курчатова;
  - В 1948 году на «МАЯКе» запущены первый промышленный реактор «А» и радиохимический завод «В», получен плутоний;
  - В августе 1949 г. испытана плутониевая атомная бомба;
  - Тогда же запущено обогащение урана методом барьерной газовой диффузии на заводе Д-1 (г. Новоуральск).

# Современное ядерное оружие

## FIRST FISSION BOMBS



MK IV (Fat Man), 20kt (1945)

## FIRST FUSION BOMBS



MK-17 (Bravo), 15Mt (1955)

## SINGLE WARHEAD DEVELOPMENT



W-59, 1Mt (1962)



Minuteman I

## MULTIPLE INDEPENDENT RE-ENTRY VEHICLE (MIRV) DEVELOPMENT



W-87, 475kt (1986)



Peacekeeper MX

# Современное ядерное оружие

- За период от 1945 по 1990 г. каждая из двух стран, СССР и США, произвела более 70 тыс. ядерных боезарядов.
- Известно, что в США производились боеголовки диаметром менее 15.5 см и весом около 45 кг при мощности 0.1 кТ. Легчайшая боеголовка в США (W54) весила 23 кг при мощности 0.25 кТ.
- Несекретные расчёты в 1990 гг. показали, что сравнительно простые имплозивные устройства могут иметь диаметр порядка 50 см с весом менее 200 кг.

# Современное ядерное оружие



The Davy Crockett Bazooka

- Страны с менее развитой ядерной энергетикой вполне могут добиться массы 500-1000 кг для бомб с мощностью в 10-30 килотонн.
- Подготовленная террористическая группа, вероятно, могла бы сделать бомбу массой 1000-1500 кг мощностью 1 – 10 килотонн.

# Источники данных и материалов

- В презентации использованы данные и изображения со следующих сайтов:
- <http://www.globalsecurity.org/wmd/systems/w88.htm>
- [worldofweirdthings.com/2009/10/28/in-space-no-one-can-hear-you-nuke/](http://worldofweirdthings.com/2009/10/28/in-space-no-one-can-hear-you-nuke/)
- <http://ru.wikipedia.org>,
- Лекции «Nuclear Warfare» by Michael Wiescher.