

# Ядерные реакции

**Ядерными реакциями** называют изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил.

Одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена **большая кинетическая энергия**.

Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия - дейтронам,  $\alpha$ -частицам и другим более тяжелым ядрам с помощью ускорителей элементарных частиц и ионов.

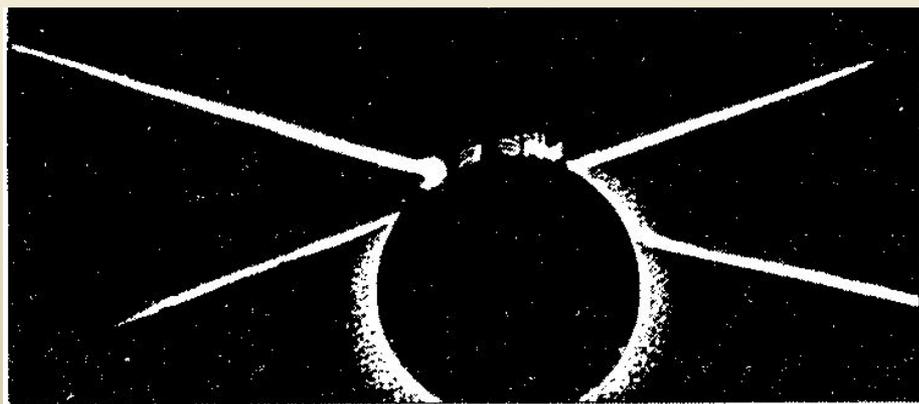
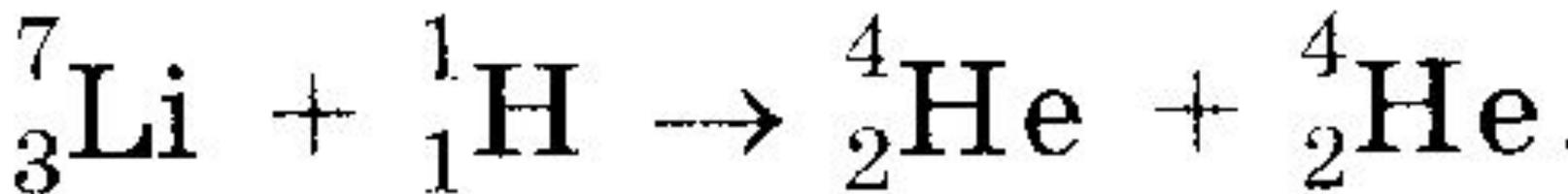
Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами. Во-первых, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка  $10^5$  МэВ, т. е. гораздо больше той, которую имеют  $\alpha$ -частицы (максимально 9 МэВ).

Во-вторых, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что их заряд вдвое меньше заряда  $\alpha$ -частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в 2 раза меньше).

В-третьих, можно ускорить ядра более тяжелые, чем ядра гелия.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в **1932** г.

Удалось расщепить литий на две  $\alpha$ -частицы:



Фотография треков в камере Вильсона:

ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль одной прямой в соответствии с требованиями закона сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих  $\alpha$ -частиц).

# Энергетический выход ядерных

## реакций

В описанной выше ядерной реакции кинетическая энергия двух образующихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии вступавшего в реакцию протона на 7,3 МэВ.

Превращение ядер сопровождается изменением их внутренней энергии (энергия связи). В рассмотренной реакции удельная энергия связи в ядрах гелия больше удельной энергии связи в ядре лития. Поэтому часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию разлетающихся  $\alpha$ -частиц.

Изменение энергии связи ядер означает, что суммарная энергия покоя участвующих в реакциях частиц и ядер не остается неизменной. Ведь энергия покоя ядра непосредственно выражается через энергию связи. В соответствии с законом сохранения энергии изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

# Энергетический выход ядерных

Энергетическим **выходом** ядерной реакции называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции.

Согласно сказанному ранее энергетический выход ядерной реакции равен также изменению кинетической энергии частиц - участников реакции.

Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции **больше**, чем до реакции, то реакция идет с **выделением энергии**.

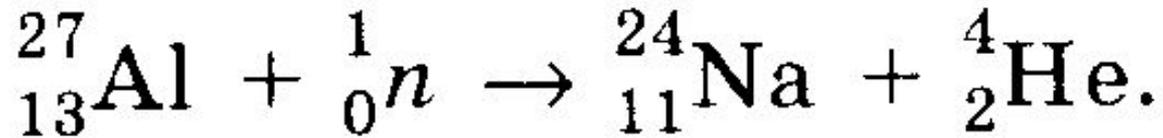
Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции **меньше**, чем до реакции, реакция идет с **поглощением энергии**.

Выделяющаяся при ядерных реакциях энергия может быть огромной. Но использовать ее путем осуществления столкновений ускоренных частиц (или ядер) с неподвижными ядрами мишени практически нельзя. Ведь большая часть ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая реакции.

# Ядерные реакции на нейтронах

Открытие нейтрона было поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Так как нейтроны лишены заряда, то они беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения.

Например, наблюдается следующая реакция:



Великий итальянский физик **Энрико Ферми** (1901-1954) первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами.

Причем эти **медленные нейтроны** оказываются в большинстве случаев даже гораздо более эффективными, чем быстрые. Поэтому быстрые нейтроны целесообразно предварительно замедлять.

Замедление нейтронов до тепловых скоростей происходит в обыкновенной воде. Этот эффект объясняется тем, что в воде содержится большое число ядер водорода - протонов, масса которых почти равна массе нейтронов. При столкновениях же шаров одинаковой массы происходит наиболее интенсивная передача кинетической энергии. При центральном соударении нейтрона с покоящимся протоном он целиком передает протону свою кинетическую энергию.



## **ФЕРМИ (Fermi), Энрико**

29 сентября 1901 г. – 30 ноября 1954 г.

[Нобелевская премия по физике](#), 1938 г.

Ферми был избран членом Национальной академии наук США (1945), почетным членом Эдинбургского королевского общества (1949) и иностранным членом Лондонского королевского общества (1950). Президентом США Ферми был назначен членом Генерального консультативного комитета Комиссии по атомной энергии (1946–1950). Он был вице-президентом (1952) и президентом (1953) Американского физического общества. Помимо Нобелевской премии, Ферми был удостоен золотой медали Matteucci Национальной академии наук Италии (1926), медали Хьюза Лондонского королевского общества (1943), гражданской медали «За заслуги» правительства Соединенных Штатов Америки (1946), медали Франклина Франклиновского института (1947), золотой медали Барнарда за выдающиеся научные заслуги Колумбийского университета (1950) и первой премии Ферми, присужденной Комиссией по атомной энергии Соединенных Штатов Америки (1954). Он был почетным доктором многих высших учебных заведений, в том числе Вашингтонского и Йельского университетов, Рокфордского колледжа, Гарвардского и Рочестерского



## ФЕРМИ (Fermi), Энрико

29 сентября 1901 г. – 30 ноября 1954 г.

Нобелевская премия по физике, 1938 г.

На переговорах с Управлением военно-морского флота в 1939 г. Ферми впервые упомянул о возможности создания атомного оружия на основе цепной реакции с мощным выделением энергии. Он получил федеральное финансирование для продолжения своих исследований. В ходе работы Ферми и итальянский физик Эмилио Сегре, бывший его студент, установили возможность использования в качестве «взрывчатки» для атомной бомбы тогда еще не открытого элемента плутония. Хотя плутоний (Pu), элемент с порядковым номером 94, еще не был известен, оба ученых были убеждены в том, что элемент с массовым числом 239 ( $^{239}\text{Pu}$ ) должен расщепляться и может быть получен в урановом реакторе при захвате нейтрона ураном-238.

# Деление ядер урана

Деление ядер урана было открыто в **1938 г.** немецкими учеными **О. Ганом** (1879-1968) и **Ф. Штрассманом** (1902-1980).

Они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы: барий, криптон и др.

Однако правильное истолкование этого факта, именно как деления ядра урана, захватившего нейтрон, было дано в начале **1939 г.** английским физиком **О. Фришем** (1904-1979) совместно с австрийским физиком **Л. Мейтнер** (1878-1968).



## Отто Ган (Otto Hahn)

08.03.1879 – 28.07.1968

Гражданство: Германия

Немецкий химик, учёный-новатор в области радиохимии, открывший ядерную изотомерию и расщепление урана. Получил Нобелевскую премию по химии за 1944 год. Гленн Сиборг назвал его *«отцом ядерной химии»*.



## Фриц (Фридрих Вильгельм) Штрассман

22 февраля 1902 — 22 апреля 1980) — немецкий химик и физик.

Научные труды посвящены ядерной химии, радиохимии. Изучал процессы ядерного деления, свойства радиоактивных изотопов урана и тория. В 1938 совместно с О. Ганом открыл деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами, химическими методами доказал факт деления.

Открытия в области радиоактивности, разработка теории атома и развитие квантовой механики объединили атомную физику и химию. Так крупнейшими успехами в исследовании ядра мы обязаны не физику, а химику, даже химику-органику Отто Гану. Ему помогал другой химик, Фриц Штрасман. Химию атомного ядра нельзя отделить от ядерной физики и ядерной техники: они образуют единое целое.

По своему образу мышления и методам работы Отто Ган, принадлежит к химикам, «во всяком случае, к исследователям, подобным великим химикам XIX века, которые благодаря своей удивительной интуиции и своим огромным способностям создали основы современной химии».

«Настоящее воздействие ядерной физики на человеческую жизнь, – сказал Макс Борн в 1962 году в своей речи по радио, – началось в 1938 году, когда в Германии Отто Ган и Фриц Штрасман открыли, что из ядер можно не только выбить отдельные протоны или другие малые частицы, что было уже известно, но и разложить ядерное образование на две примерно одинаковые по величине части».



## ФРИШ Отто Роберт

(Frisch Otto Robert) (1.X.1904 - 22.IX.1979) — английский физик-экспериментатор, член Лондонской королевской об-ва (1948).

Работы посвящены ядерной физике, физике молекулярных пучков.

В 1939 (январь) вместе с Л *Мейтнер* дал правильную интерпретацию опытов *О. Гана* и *Ф. Штрассманна* как явления деления ядер урана нейтронами и экспериментально проверил его, доказав существование высокоэнергетических осколков ядер урана.



## Лизе МЕЙТНЕР (Meitner)

7 ноября 1878 г. – 27 октября 1968 г.  
– австрийский физик и радиохимик.

Основные исследования относятся к ядерной физике и радиохимии. Делом жизни Лизе Мейтнер стали исследования радиоактивности и получение радиоактивных химических элементов.

# ФРИШ Отто

## Роберт

В 1933 году совместно с Отто Штерном экспериментально определил магнитный момент протона.

В Копенгагене совместно с теоретиком Георгом Плачеком изучал процессы рассеяния и захвата нейтронов веществом, показал, что вероятность поглощения нейтрона зависит не только от скорости последнего, но и от массы атома вещества.

Зимой 1938-1939 года, на Рождество, Фриш посетил в Швеции (близ Гетеборга) свою тётю Лизу Мейтнер, которая как раз получила сведения о результатах опытов Отто Гана и Фрица Штрассмана.

В январе 1939 года Фришу и Мейтнер удалось верно объяснить эти опыты с помощью представления о делении ядер урана при бомбардировке нейтронами и впервые рассчитать энергетический выход реакции деления. Вернувшись в Копенгаген, Фриш экспериментально проверил это предположение при помощи камеры Вильсона (схема опыта была предложена Георгом Плачеком) и, таким образом, доказал существование крупных осколков деления урановых ядер.

# Лизе МЕЙТНЕР

Основные исследования относятся к ядерной физике и радиохимии. В 1917 г. совместно с О. Ганом открыла новый радиоактивный элемент протактиний (одновременно с Ф. Содди и Д. Крэнстоном).

Предложила (1921) теорию строения ядер, согласно которой в их состав входят  $\alpha$ -частицы, протоны и электроны.

Доказала (1925), что испускание  $\gamma$ -излучения ядром возможно только после вылета  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы.

Совместно с О. Ганом изучала (1935-1937) продукты облучения урана нейтронами, считая, что при этом имеет место образование элементов с атомным номером  $Z \leq 97$ .

Совместно с датским физиком О. Фришем обосновала (1939) представление о делении ядер под действием нейтронов и дала теоретическое объяснение (совместно с О. Фришем) опытов О. Гана и Ф. Штрассмана, обнаруживших барий в продуктах ядерного распада урана.

В честь Лизе Мейтнер назван искусственно полученный химический элемент №109 – мейтнерий.

Деление ядра **возможно** благодаря тому, что **масса покоя тяжелого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении.**

Из-за этого происходит выделение энергии, эквивалентной уменьшению массы покоя, сопровождающему деление. Но полная масса сохраняется, так как масса движущихся с большой скоростью осколков превышает их массу покоя.

Возможность деления тяжелых ядер можно также объяснить с помощью графика зависимости удельной энергии связи от массового числа  $A$ . Удельная энергия связи ядер атомов, занимающих в периодической системе последние места ( $A \approx 200$ ), примерно на 1 МэВ/нуклон меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, находящихся в середине периодической системы ( $A \approx 100$ ). Поэтому процесс деления тяжелых ядер на ядра элементов средней части периодической системы является **«энергетически выгодным»**.

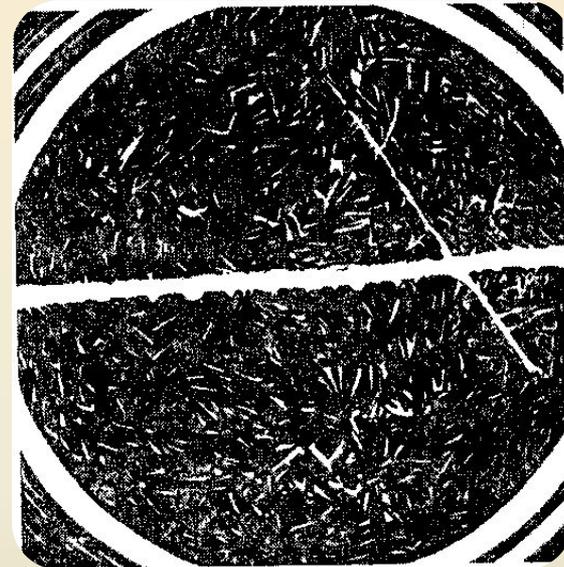
Система после деления переходит в состояние с **минимальной внутренней энергией**. Ведь чем больше энергия связи ядра, тем большая энергия должна выделяться при образовании ядра и, следовательно, тем меньше внутренняя энергия образовавшейся вновь системы.

При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на **1 МэВ** и общая выделяющаяся энергия должна быть огромной порядка **200 МэВ**. **Ни при какой другой ядерной реакции (не связанной с делением) столь больших энергий не выделяется!**

Непосредственные измерения энергии, выделяющейся при делении ядра урана ( $^{235}_{92}\text{U}$ ) подтвердили приведенные соображения и дали значение  $\approx 200$  МэВ. Большая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков.

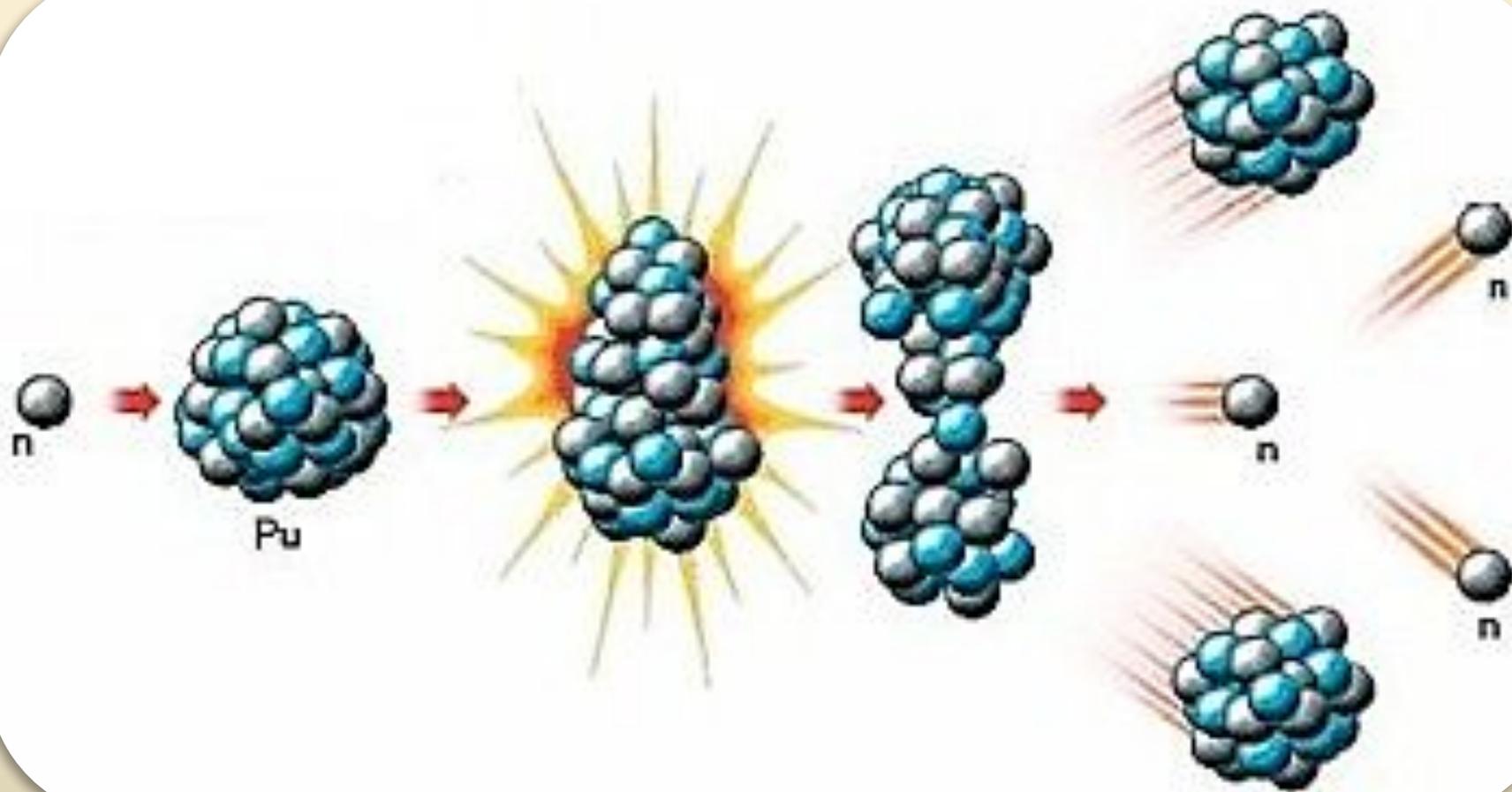
Выделявшаяся при делении ядра энергия имеет **электростатическое, а не ядерное происхождение!**

Большая кинетическая энергия, которую имеют осколки, возникает вследствие их **кулоновского отталкивания**.

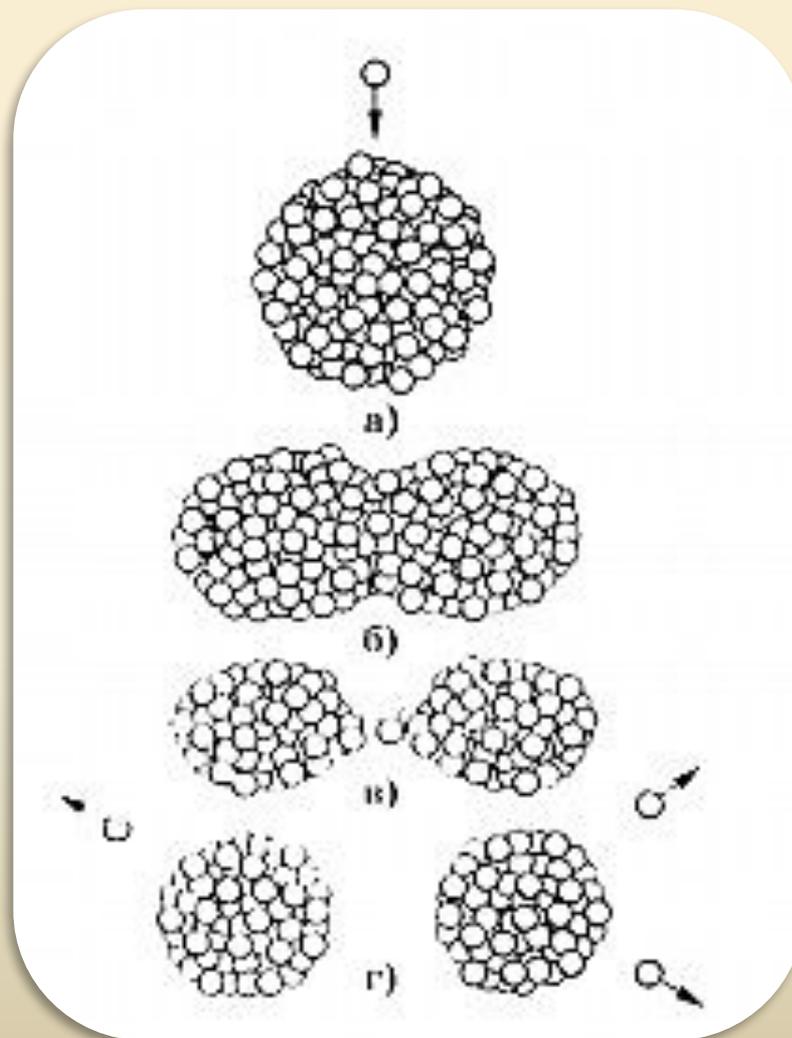


Треки осколков делящегося урана в камере Вильсона.

# Механизм деления ядра



# Механизм деления ядра



## Испускание нейтронов в процессе

**Фундаментальным фактом ядерного деления является испускание в процессе деления двух-трех нейтронов.**

Именно благодаря этому оказалось возможным практическое использование внутриядерной энергии.

Понять, почему происходит испускание свободных нейтронов, можно, исходя из следующих соображений. Известно, что **отношение числа нейтронов к числу протонов в стабильных ядрах возрастает с повышением атомного номера**. Поэтому у возникающих при делении осколков относительное число нейтронов оказывается большим, чем это допустимо для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева. В результате несколько нейтронов освобождается в процессе деления. Их энергия имеет различные значения - от нескольких миллионов электронвольт до совсем малых, близких к нулю.

Деление обычно происходит на осколки неравной массы. Осколки эти сильно радиоактивны, так как содержат избыточное количество нейтронов. В результате серии последовательных  $\beta$ -распадов в конце концов получаются стабильные изотопы.

Существует спонтанное деление ядер урана. Оно было открыто советскими физиками Г. Н. Флеровым и К.А. Петржаком в 1940 г. Период полураспада для спонтанного деления равен  $10^{16}$  лет. Это в два миллиона раз больше периода полураспада при  $\alpha$ -распаде урана.



# Георгий Николаевич Флёров

(17 февраля (2 марта) 1913,  
Ростов-на-Дону — 19 ноября 1990,  
Москва) — советский физик-ядерщик,  
сооснователь Объединённого института ядерных  
исследований в Дубне, академик АН СССР (1968).  
принадлежит к плеяде основоположников ядерной  
физики в Советском Союзе. Его научная деятельность  
неразрывно связана со становлением атомной  
отрасли, с созданием новых оригинальных научных  
направлений, с крупными открытиями в области  
деления ядер, синтеза новых химических элементов,  
новых видов радиоактивности.

Исключительный талант физика-  
экспериментатора, удивительная интуиция, смелость  
при постановке сверхзадач, острый критический  
подход, умение четко анализировать совокупность  
сложных экспериментальных фактов, глубокое  
понимание сущности физических явлений,  
необычайная энергия и умение довести до  
завершения свои замыслы, гражданская  
ответственность характеризуют его как выдающегося



## **Петржак Константин Антонович**

**04 сентября 1907 - 10 октября  
1998**

лауреат Государственных  
премий СССР, доктор  
физико-математических  
наук, выдающийся ученый,  
стоявший у истоков  
создания ядерного щита  
страны, ветеран Великой  
Отечественной войны,

*В 1940 г. под руководством Игоря Курчатова Константин Петржак в творческом содружестве с Георгием Флеровым открыл "явление спонтанного деления ядер", которое принесло авторам мировую известность.*

*С первых дней Великой Отечественной войны ушел в армию. С 1942 г. по приказу Государственного комитета обороны его демобилизуют и направляют для выполнения специальных работ в Радиевый институт, приблизивший страну к обладанию ядерным оружием. Блестящий экспериментатор и организатор науки, К.Петржак сформировал научную школу исследователей в области физики деления ядер и радиационного материаловедения, в 1949 г. он открыл кафедру ядерной физики в Ленинградском технологическом институте.*

Константин Антонович Петржак всю жизнь проработал в Радиевом институте. Имя ученого известно, в основном, благодаря одному из наиболее ярких событий в ядерной физике XX века – открытию спонтанного деления урана, сделанному им вместе с Г.Н. Флеровым в 1940

Отто Гану, как ученому, лишь на 60-м году жизни удалось добиться наиболее значительных успехов. Как и в случае установленного Планком квантообразного обмена энергии, это объяснялось прежде всего тем, что проникновение во взаимосвязи природы, о которых здесь шла речь, раньше было, по существу, невозможно.

Исследования в области химии радия, которые Отто Ган вел в течение 30 лет совместно с Лизой Мейтнер также были отмечены рядом достижений: он открыл новые радиоактивные вещества, основал новое направление в химии радия и применил результаты исследования радиоактивности в физике, химии и геологии.

Однако открытие расщепления урана, ставшее одной из важнейших вех на пути к атомному веку, было самым крупным его достижением. Оно настолько отодвинуло на задний план все его прежние открытия, что Гана принято считать только первооткрывателем расщепления урана, как Эйнштейна часто рассматривают только как «создателя теории относительности», несмотря на то что ему принадлежит немало других важных открытий.

Применение открытия Гана для создания средств массового уничтожения объясняется сложившимися политическими условиями. Здесь нет вины ученых. Но именно это трагическое сцепление судеб науки и общества сделало [Отто Гана](#) своеобразной фигурой всемирно-исторического значения, одним из таких естествоиспытателей, значение которых выходит далеко за пределы частнонаучной сферы, подобно тому как это произошло (в силу иных причин) с Галилеем или Дарвином.

# ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может в свою очередь вызвать деление соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер очень быстро увеличивается. Возникает цепная реакция. Ядерной цепной реакцией называется реакция, в которой частицы, вызывающие ее (нейтроны), образуются как продукты этой же реакции.

**Ядерной цепной реакцией** называется реакция, в которой частицы, вызывающие ее (нейтроны), образуются как продукты этой же реакции.

Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии.

**При делении каждого ядра выделяется около 200 МэВ.**

*Но для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые ядра, делящиеся под влиянием нейтронов. В силу ряда причин из ядер, встречающихся в природе, пригодны лишь  $^{235}\text{U}$  ядра изотопа урана с*

*массовым числом 235, т. е.  $^{235}\text{U}_{92}$*

## Изотопы урана

Естественный уран состоит в основном из двух изотопов:



Но изотоп  $^{235}\text{U}_{92}$  составляет всего 1/140 долю от более распространенного изотопа  $^{238}\text{U}_{92}$ .

Ядра  $^{235}\text{U}_{92}$  делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов.

Ядра  $^{238}\text{U}_{92}$  могут делиться лишь под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление  $^{238}\text{U}_{92}$ . Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа  $^{238}\text{U}_{92}$  **невозможна.**

## Коэффициент размножения

Если  $k \geq 1$ , то число нейтронов увеличивается с течением времени или остается постоянным и **цепная реакция идет**.

При  $k < 1$  число нейтронов убывает и **цепная реакция невозможна**.

**Коэффициентом размножения нейтронов** называют отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов предшествующего «поколения».

Под сменой поколений понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого «поколения» и рождаются новые нейтроны.

## Коэффициент размножения определяется следующими четырьмя факторами:

Для **стационарного** течения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть **равен единице**. Это равенство необходимо поддерживать с большой точностью.

Уже при  $k = 1,01$  почти мгновенно произойдет

**взрыв!!!**

Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов (в основном за счет деления  $^{235}\text{U}_{92}$ ). Все остальные приводят к их **убыли**.

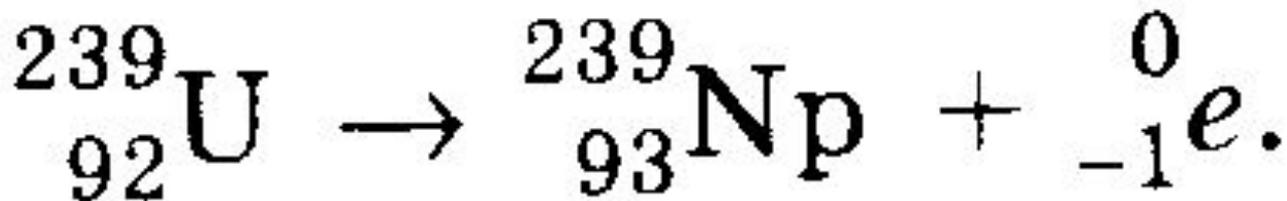
Цепная реакция в чистом изотопе  $^{238}\text{U}_{92}$  невозможна, так как в этом случае  $k < 1$  (число нейтронов, поглощаемых ядрами без деления, больше числа нейтронов, вновь образующихся за счет деления ядер).

## Образование плутония

Важное значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов ядрами изотопа урана  $^{238}\text{U}_{92}$ .

После захвата образуется радиоактивный изотоп  $^{239}\text{U}_{92}$  с периодом полураспада 23 мин.

Распад происходит с испусканием электрона и возникновением первого трансуранового элемента - **нептуния**.

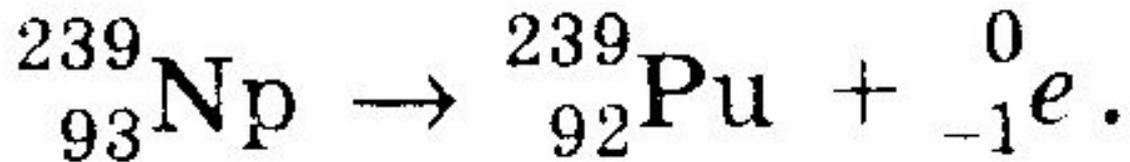


**Трансурановые элементы** – химические элементы с зарядом (числом протонов) большим, чем у урана, т.е.  $Z > 92$ .

*Все они были получены искусственным путем.*

**Нептуний** в свою очередь  **$\beta$ -радиоактивен** с периодом полураспада около двух дней.

В процессе распада нептуния образуется следующий трансурановый элемент - **плутоний**:



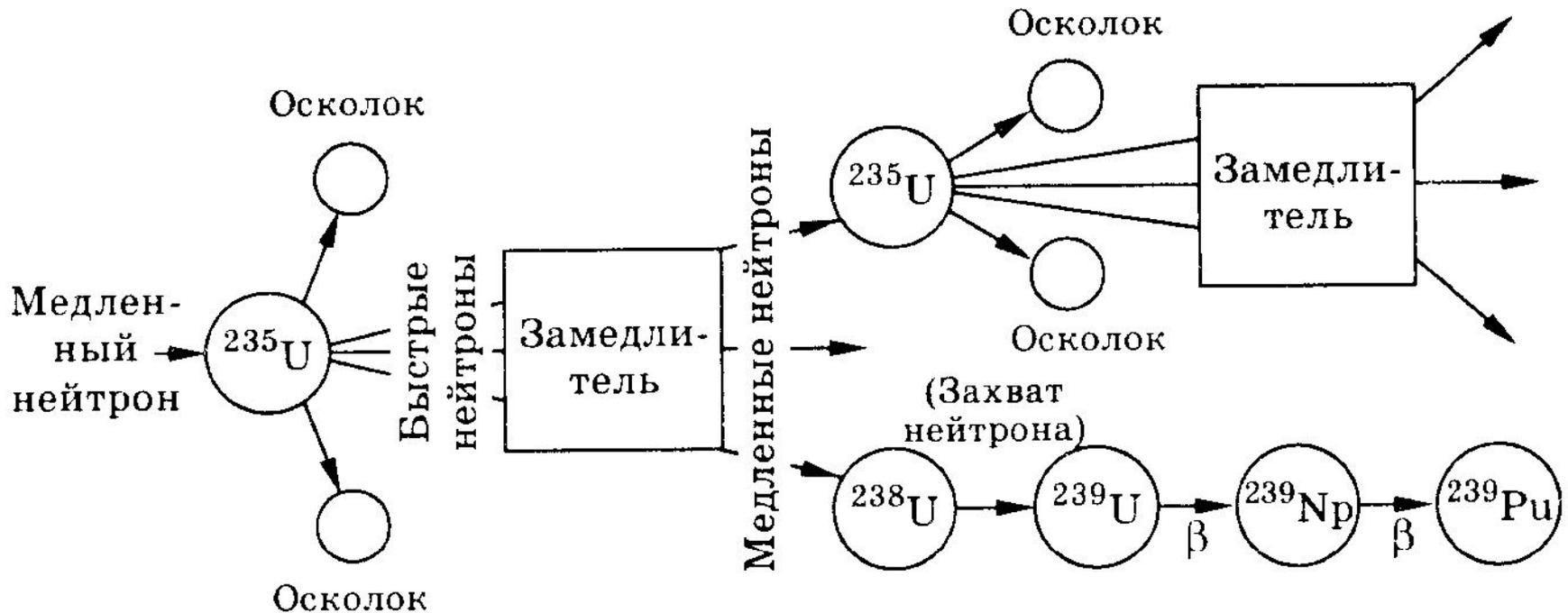
**Плутоний** относительно стабилен, так как его период полураспада велик - порядка 24 000 лет.

**Важнейшее свойство плутония** состоит в том, что он делится под влиянием **медленных нейтронов**, так же как и изотоп  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

**Поэтому с помощью плутония также может быть осуществлена цепная реакция, которая сопровождается выделением громадной энергии.**

# ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

**Ядерным** (или атомным) **реактором** называется устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.



# Основные элементы ядерного реактора

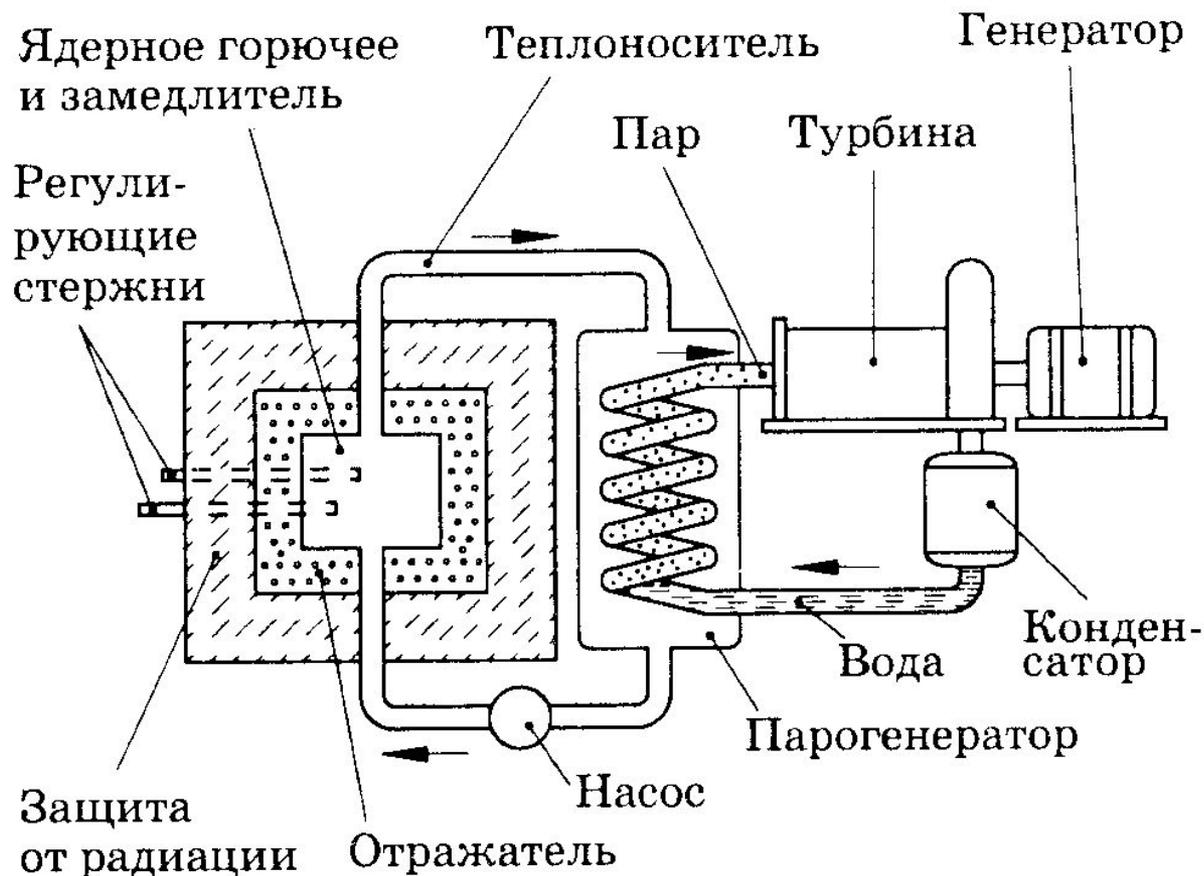


Схема энергетической установки с ядерным реактором

Снаружи реактор окружают защитной оболочкой, задерживающей  $\gamma$ -излучение и нейтроны. Оболочку выполняют из бетона с железным наполнителем.

Основными элементами ядерного реактора являются: ядерное горючее ( $^{235}\text{U}_{92}$ ,  $^{239}\text{Pu}_{94}$ ,  $^{238}\text{U}_{92}$  и др.), замедлитель нейтронов (тяжелая или обычная вода, графит и др.), теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.) и устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор - вещества, которые хорошо поглощают нейтроны).

# Критическая

Для чистого (без замедлителя) урана  $^{235}\text{U}_{92}$  имеющего форму шара, критическая масса приблизительно равна 50 кг. При этом радиус шара равен примерно 9 см (уран - очень тяжелое вещество).

Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

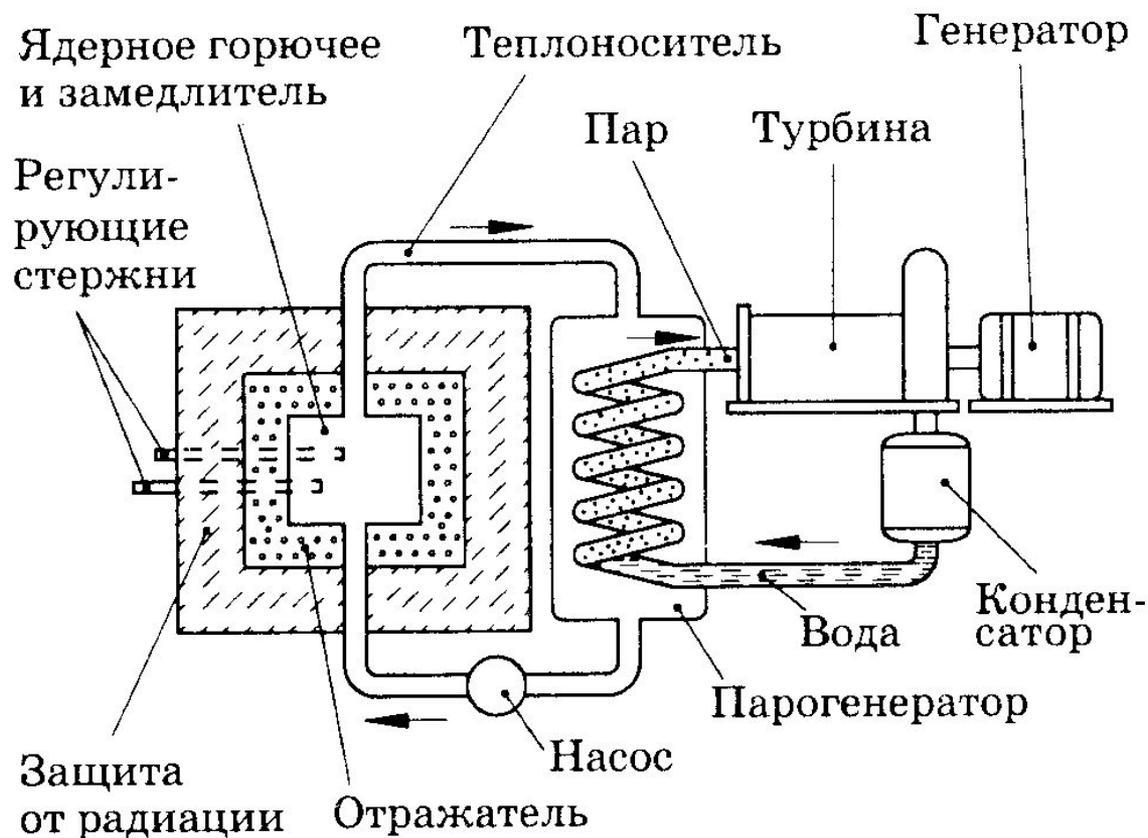
**Критической массой** называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция.

Поэтому, увеличивая систему, можно достичь значений коэффициента размножения  $k \approx 1$ .

Система будет иметь критические размеры, если число нейтронов, потерянных вследствие захвата и утечки, равно числу нейтронов, полученных в процессе деления. Критические размеры и соответственно критическая масса определяются **типом ядерного горючего, замедлителем и конструктивными особенностями реактора**

Управление реактором осуществляется при помощи стержней, содержащих кадмий или бор.

При **выдвинутых** из активной зоны реактора стержнях  $k > 1$ , а при **полностью вдвинутых** стержнях  $k < 1$ .



Вдвигая стержни внутрь активной зоны, можно в любой момент времени приостановить развитие цепной реакции. Управление ядерными реакторами осуществляется дистанционно с помощью ЭВМ.

# Реакторы на быстрых нейтронах

Построены реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах.

Так как вероятность деления, вызванного быстрыми нейтронами, мала, то такие реакторы не могут работать на естественном уране. Реакцию можно поддерживать лишь в обогащенной смеси, содержащей не менее 15% изотопа  $^{235}\text{U}_{92}$ .

Преимущество реакторов на быстрых нейтронах в том, что при их работе образуется значительное количество плутония, который затем можно использовать в качестве ядерного топлива.

Эти реакторы называют **реакторати-размножителями**, так как они воспроизводят делящийся материал.

## Первые ядерные реакторы

Впервые цепная ядерная реакция деления урана была осуществлена в США коллективом ученых под руководством Энрико Ферми в декабре 1942 г.

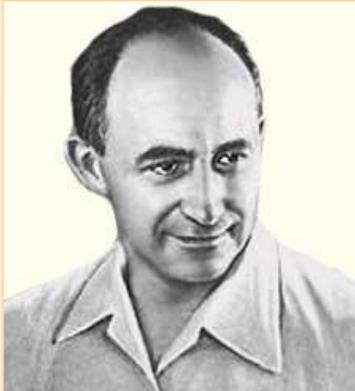


### Энрико Ферми

(1901-1954)

— виднейший итальянский физик, один из создателей ядерной и нейтронной физики, основатель научных школ в Италии и США, иностранный член-корреспондент АН СССР (1929).

Автор многочисленных работ в области квантовой теории и физики элементарных частиц.



## Энрико Ферми

В 1938 году эмигрировал в США.

Разработал квантовую статистику (статистика Ферми - Дирака; 1925 год), теорию бета-распада (1934).

Открыл с сотрудниками искусственную радиоактивность, вызванную нейтронами, замедление нейтронов в веществе (1934).

Построил первый ядерный реактор и первым осуществил в нем (2 декабря 1942 года) цепную ядерную реакцию.

Нобелевская премия (1938 год).

В нашей стране первый ядерный реактор был запущен 25 декабря 1946 г. коллективом физиков, который возглавлял наш замечательный ученый **Игорь Васильевич Курчатов** (1903-1960).



## **Игорь Васильевич КУРЧАТОВ** (1903 – 1960)

*Академик АН СССР.*

*Трижды герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Сталинских премий СССР.*

*Награжден пятью орденами Ленина, другими орденами и медалями, в том числе Серебряной медалью Мира им. Жолио-Кюри.*

## Игорь Васильевич КУРЧАТОВ



Академик Игорь Васильевич Курчатов занимает особое место в науке XX века и в истории нашей страны. Ему - выдающемуся физики - принадлежит исключительная роль в разработке научных и научно-технических проблем овладения ядерной энергией в Советском Союзе. Решение этой сложнейшей задачи, создание в сжатые сроки ядерного щита Родины в один из наиболее драматических периодов истории нашей страны, разработка проблем мирного использования ядерной энергии было главным делом его жизни.

И.В. Курчатов обладал лучшими качествами ученого и человека. Преданность науке и понимание ее значения для страны сочетались у него с исключительными организационными способностями и высочайшей ответственностью перед страной за свою работу, строгим, но доброжелательным отношением к своим коллегам. Неотъемлемыми качествами Игоря Васильевича были увлеченность и настойчивость в достижении поставленной цели, поразительная работоспособность.

Научная деятельность И.В. Курчатова развивалась в таких актуальных направлениях современной ему физики, как физика твердого тела и ядерная физика, и в новых, создававшихся трудами его и руководимых им коллективов научно-технических направлений – ядерной технике и ядерной энергетике.

# ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Масса покоя ядра урана больше суммы масс покоя осколков, на которые делится ядро.

Для легких ядер дело обстоит как раз наоборот. Так, масса покоя ядра гелия значительно меньше суммы масс покоя двух ядер тяжелого водорода, на которые можно разделить ядро гелия. Это означает, что при слиянии легких ядер масса покоя уменьшается и, следовательно, должна выделяться значительная энергия. Подобного рода реакции слияния легких ядер могут протекать только при очень высоких температурах. Поэтому они называются **термоядерными**.

**Термоядерные реакции** - это реакции слияния легких ядер при **очень высокой** температуре.

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизилась на расстояние около  $10^{-12}$  см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил.

Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счет большой кинетической энергии теплового движения ядер.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчете на один нуклон, **превышает** удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер.

Так, при слиянии тяжелого водорода - дейтерия со сверхтяжелым изотопом водорода - тритием выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

# Термоядерные реакции в

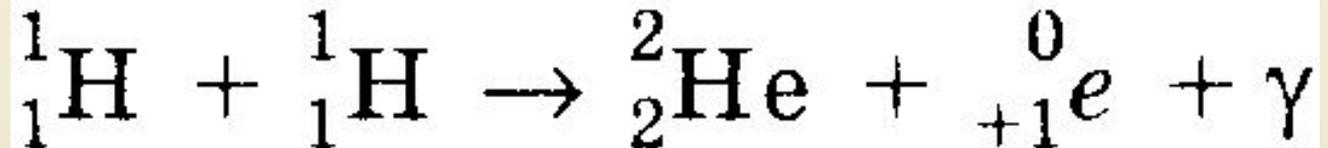
## звездах

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение.

По современным представлениям на ранней стадии развития звезды она в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния протонов с образованием гелия. Однако реакция слияния сразу четырех протонов чрезвычайно маловероятна.

Реакции происходят при соударениях пар частиц.

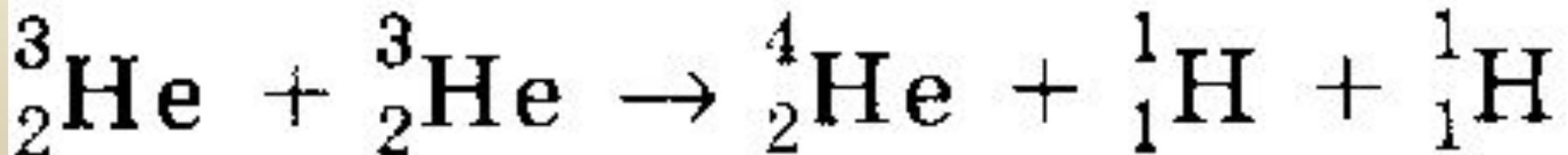
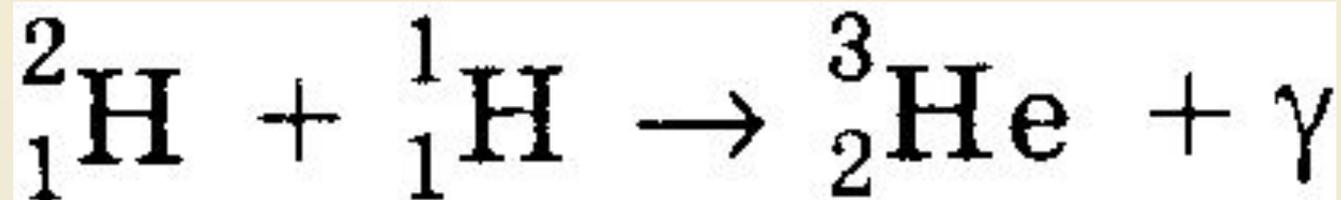
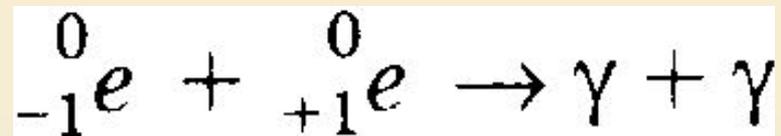
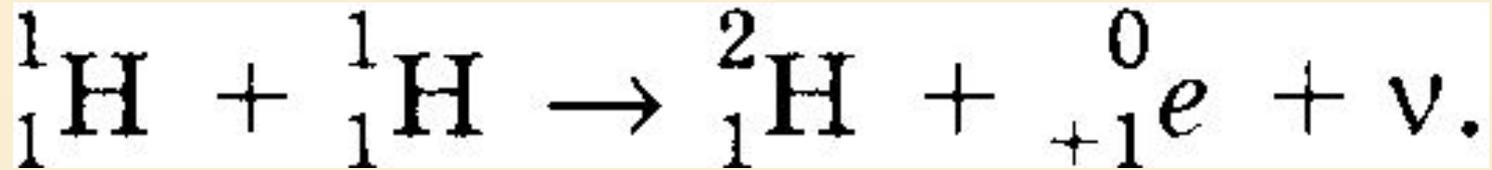
При этом реакция



невозможна из-за того, что изотоп гелия  ${}^2\text{He}_2$  не существует.

*На разных стадиях развития звезд на первый план выдвигаются различные циклы реакций, конечным результатом которых является образование гелия  ${}^4\text{He}_2$  из четырех протонов.*

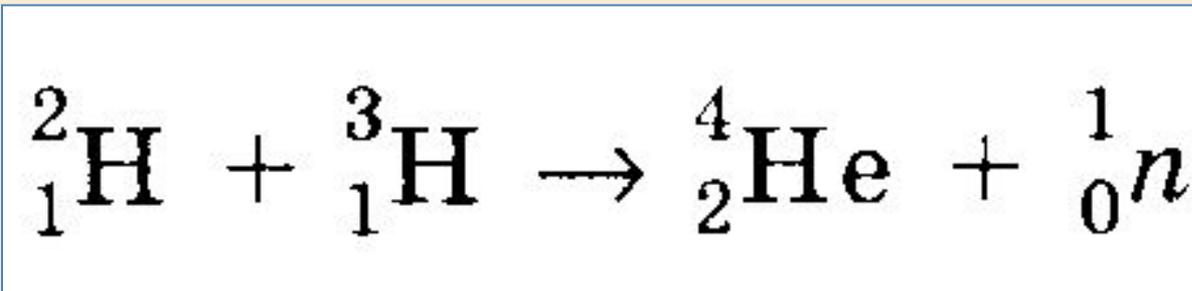
## Термоядерные реакции на Солнце



# Управляемые термоядерные реакции

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии.

Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия с тритием:



В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ.

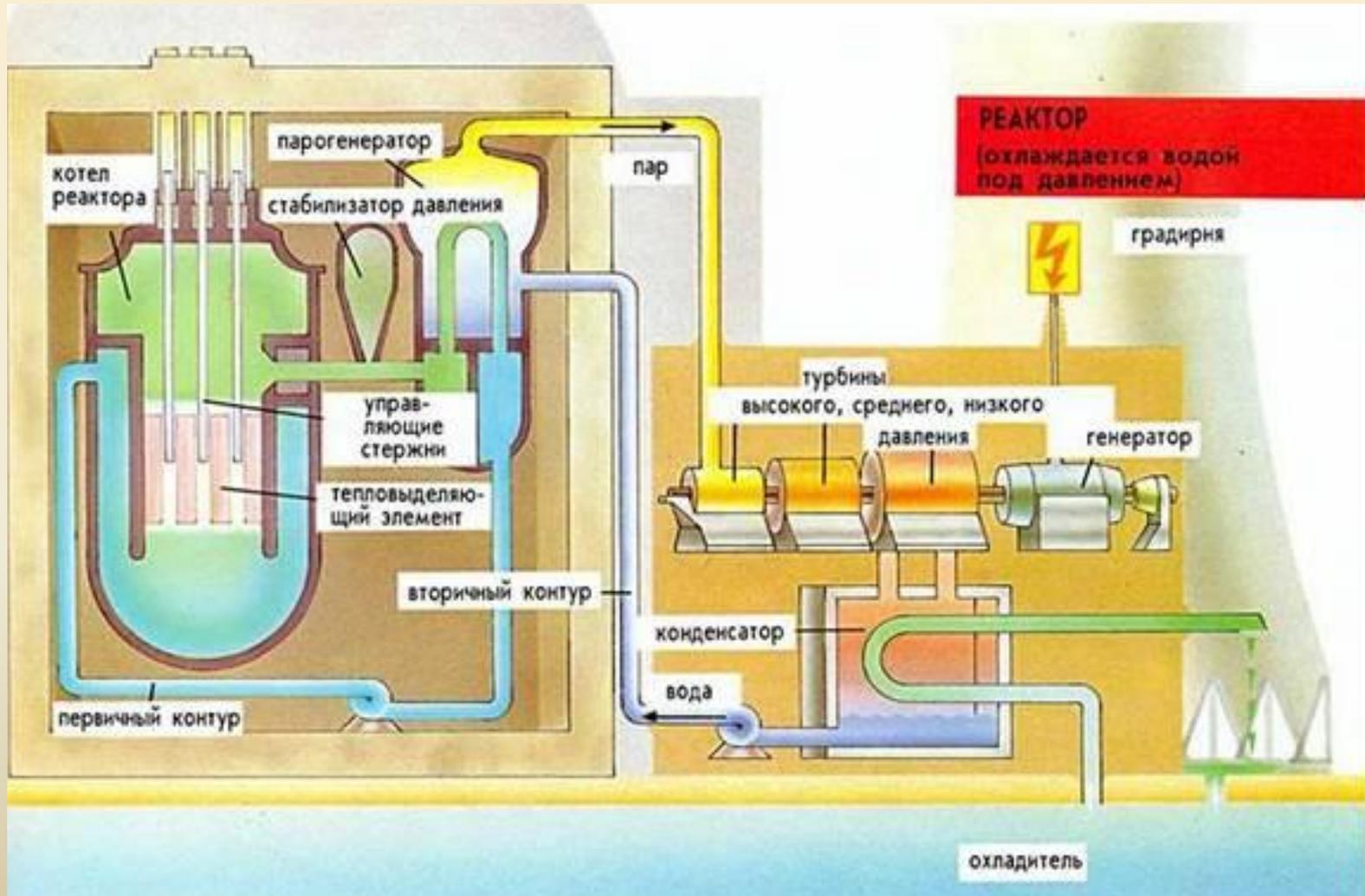
*Поскольку трития в природе нет, он должен вырабатываться в самом термоядерном реакторе из лития.*

Экономически выгодная реакция, как показывают расчеты, может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов кельвин при большой плотности вещества ( $10^{14}$ - $10^{15}$  частиц в  $1 \text{ см}^3$ ). Такие температуры могут быть в принципе достигнуты путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки на протяжении 0,1-1 с.

Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственным возможным является метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объеме с помощью очень сильных магнитных полей. Однако до сих пор решить эту задачу не удалось из-за неустойчивости плазмы. Неустойчивость приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные «стенки».

*Ученые нашей страны достигли больших успехов в создании управляемых термоядерных реакций. Эти работы были начаты под руководством академиков Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича и продолжаются их учениками.*

В настоящее время созданы различные типы реакторов, отличающихся друг от друга как по мощности, так и по своему назначению. Наиболее перспективными являются реакторы-размножители на быстрых нейтронах.



## Лазерный термоядерный синтез

Параллельно ведутся работы по осуществлению управляемого термоядерного синтеза за счет **нагрева мишени мощными лазерными импульсами.**

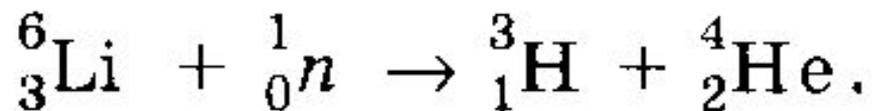
Термоядерная мишень представляет собой полый стеклянный шарик диаметром 0,1-1 мм с очень тонкими стенками. Шарик наполнен смесью дейтерия и трития.

На мишень фокусируются излучения десятков мощнейших лазерных импульсов. Оболочка мишени испаряется и разлетается в стороны. Одновременно внутренние слои мишени согласно закону сохранения импульса устремляются к центру.

Вещество сжимается и нагревается до температур, при которых возможен термоядерный синтез.

Разрабатываются проекты лазерных реакторов, работающих в **импульсном режиме**. Наиболее перспективны **гибридные реакторы**, в которых наряду с реакцией синтеза используется цепная реакция деления ядер урана под действием нейтронов, возникающих при термоядерном синтезе.

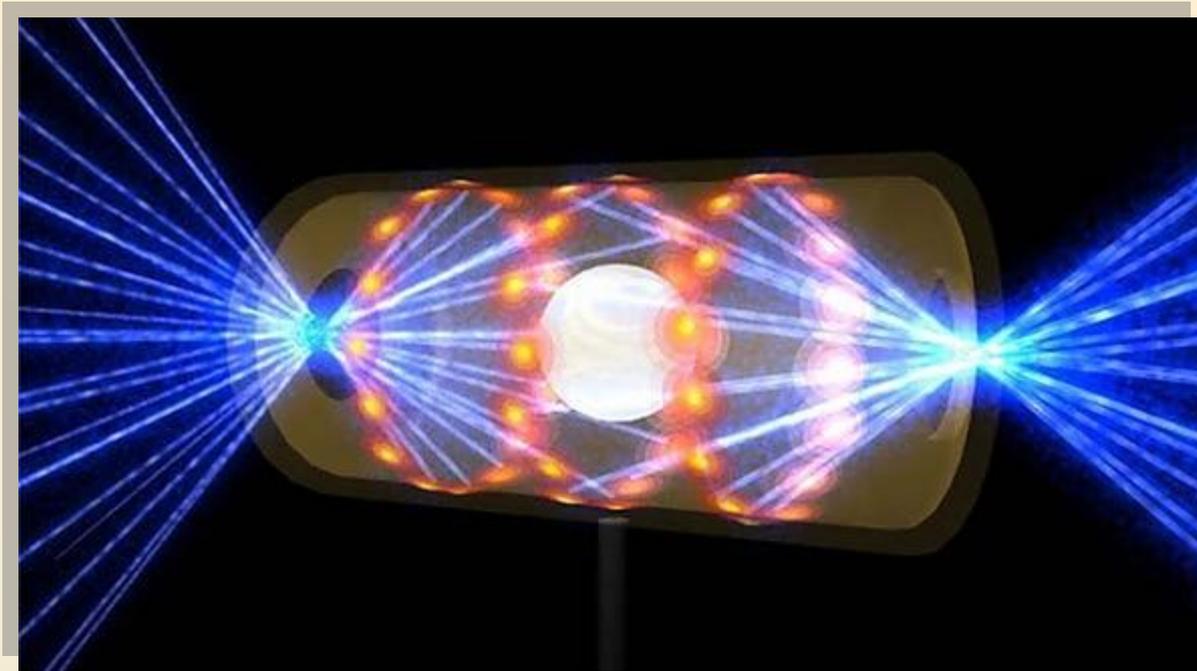
При этом тритий воспроизводится из дешевого лития согласно реакции:



Несколько раз в секунду термоядерная мишень должна вводиться в реактор и обстреливаться лазерными импульсами.

На каком пути удастся создать промышленный термоядерный реактор, пока не ясно.

Пока же удалось осуществить лишь неуправляемую реакцию синтеза взрывного типа в водородной (или термоядерной) бомбе.



Новый реактор NIF использует массив из 192 мощных лазерных пушек, направленных на маленький контейнер. Внутри него помещаются гранулы переохлажденных изотопов водорода в твердом состоянии. Лазерные лучи, попадающие на стенки контейнера генерируют рентгеновское излучение, обстреливающее образец. Этот процесс удаляет из гранул атомы водорода, попутно нагревая их до миллионов градусов. В результате испарения небольшого количества массы высвобождается большая энергия. Аналогичный процесс происходит и на Солнце.