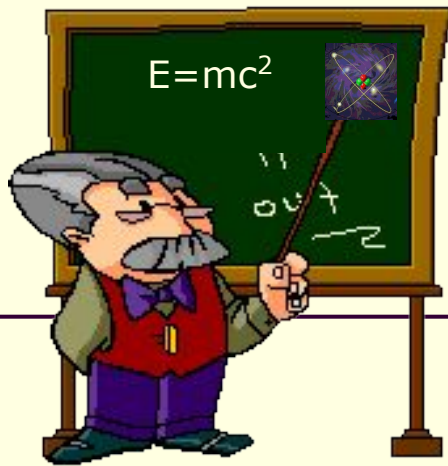




Мы тайны эти с корнем вырвем у ядра  
На волю пустим джинна из бутылки!  
В.Высоцкий

# Ядерные реакции

# Радиоактивность

---

Радиоактивность - способность ядер самопроизвольно распадаться, испуская частицы.

Радиоактивность



# Радиоактивность естественная

---

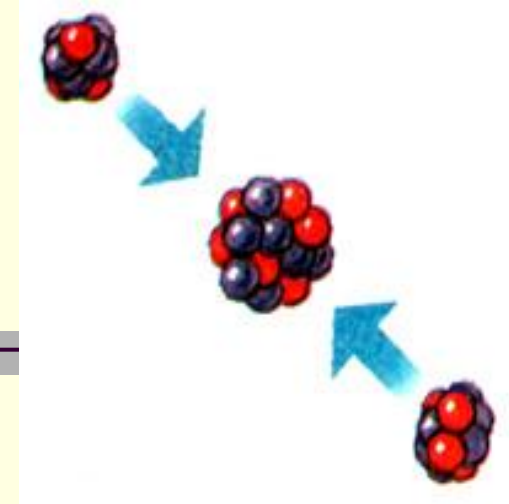
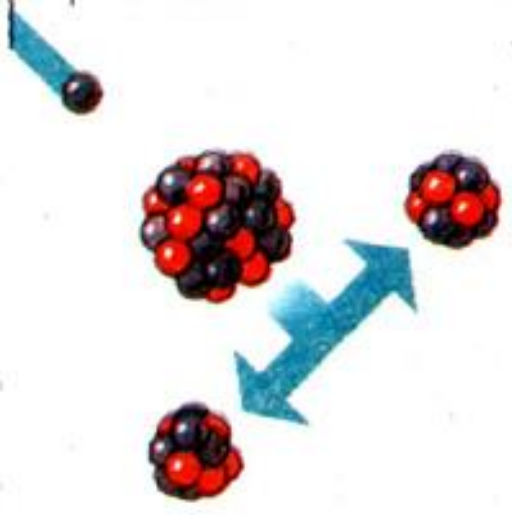
1. В чем проявляется это явление?
  2. У каких изотопов наблюдается?
  3. Какими видами излучений сопровождается?
- Для каждого из видов радиоактивного распада*
- а. Что является причиной возникновения данного вида радиоактивного распада
  - б. В чем проявляется

# Радиоактивность естественная

| вид        | причина                     | следствие                                                                                                                                                               |                               |
|------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $\alpha$ - | избыток протонов            | избыточная энергия ядра на каждый протон $E_k = 4,871 \text{ МэВ}$                                                                                                      | выброс протонов с ядром гелия |
| $\beta$ -  | Избыток нейтронов           | избыточная энергия ядра на каждый электрон<br>$E_k$ от 0 до $E_k = 0,783 \text{ МэВ}$<br>из-за превращения:<br>${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \tilde{\nu}$ | Выброс электронов             |
| $\gamma$ - | Возбужденное состояние ядра | избыточная энергия ядра                                                                                                                                                 | излучение фотона              |

# Искусственная радиоактивность

---



- распад изотопов, полученных при ядерных реакциях

# Ядерные реакции

---

**Ядерная реакция – это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или гамма-квантов.**

# Ядерные реакции

---

Прочитайте §107 учебника.

Запишите

1. при каких условиях могут протекать ядерные реакции.
2. почему для осуществления ядерных реакций частицы разгоняют ускорителями элементарных частиц и ионов, а не используют альфа - частицы, получаемые в процессе радиоактивного распада

## Условия, для протекания ядерной реакции.

### Частица должна

1. попасть в сферу действия ядерных сил (на расстояния порядка  $10^{-15}\text{м}$ )
2. Обладать достаточной кинетической энергией

Эффективность использования ускорителей объясняется тем, что:

1. частицам может быть сообщена энергия порядка  $10^5 \text{ МэВ}$  (у альфа частицы она порядка 9 МэВ)
2. можно использовать протоны, которые не появляются при радиоактивном распаде

$$\left( q_p = 0,5q_\alpha \Rightarrow F_{\text{вд}} \cdot p = 0,5F_{\text{вд}} \cdot \alpha \right)$$

Первая реакция такого рода была осуществлена с помощью протонов большой энергии, полученных на ускорителе, в 1932 году:

3. можно ускорять  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_2\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$  частицы, более тяжелые, чем ядра гелия.

В результате ядерных реакций **могут образовываться новые радиоактивные изотопы**, которых **нет на Земле** в естественных условиях.

# Ядерные реакции

---

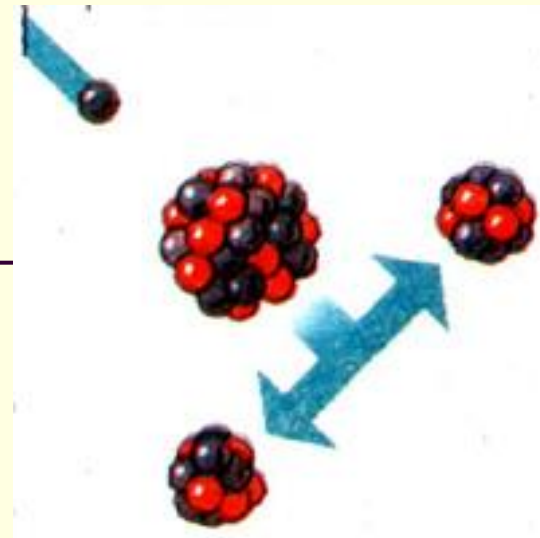
При ядерных реакциях **выполняется несколько законов сохранения:**

- импульса,
- энергии,
- момента импульса,
- заряда
- числа нуклонов – протонов и нейтронов.

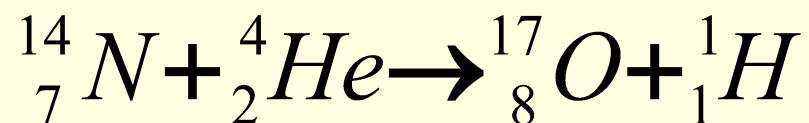
Выполняется также ряд других законов сохранения, специфических для ядерной физики и физики элементарных частиц.

# Ядерные реакции

Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году в опытах по обнаружению протонов в продуктах распада ядер.



Резерфорд бомбардировал атомы азота  $\alpha$ -частицами. При соударении частиц происходила ядерная реакция, протекавшая по следующей схеме:



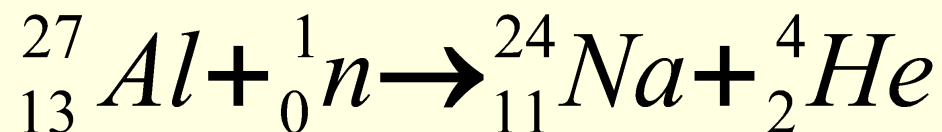
# Ядерные реакции

**Для практического использования наиболее интересными являются реакции, протекающие при взаимодействии ядер с нейтронами.**

**Так как нейтроны лишены заряда, они беспрепятственно могут проникать в атомные ядра и вызывать их превращения.**

**Выдающийся итальянский физик Э. Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами.**

**Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами, движущимися с тепловыми скоростями**



# Энергетический выход ядерной реакции

Ядерные реакции сопровождаются энергетическими превращениями.

Энергетическим выходом ядерной реакции называется величина, равная разности энергий покоя ядер и частиц до и после реакции

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D)c^2 = \Delta M c^2$$

где  $M_A$  и  $M_B$  – массы исходных продуктов,  
 $M_C$  и  $M_D$  – массы конечных продуктов реакции.  
Величина  $\Delta M$  называется **дефектом масс**.

# КАК РЕШИТЬ ЗАДАЧУ ?



Ядерные реакции могут проходить с поглощением или выделением энергии. Как определить, **выделяется или поглощается энергия при ядерной реакции**, если дано уравнение ядерной реакции?



- Чтобы выяснить этот вопрос, необходимо определить знак дефекта масс.
- **Расчетная формула:**

$$\Delta m = \sum M_{\text{ядер}}^{\text{до начала реакции}} - \sum M_{\text{ядер}}^{\text{после окончания реакции}}$$



Если в результате расчета получим **положительное** значение дефекта масс, энергия **выделяется**.

Если в результате расчета получим **отрицательное** значение дефекта масс, энергия **поглощается**.

**Справочные данные берем из таблицы относительных атомных масс некоторых изотопов (табл.13 - задачник Рымкевича).**

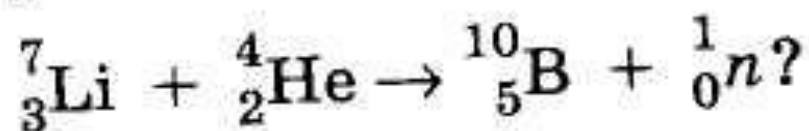
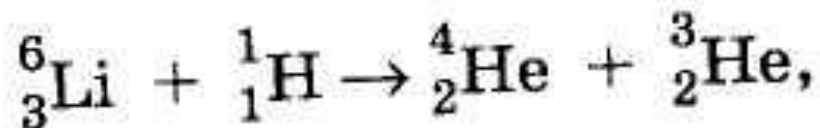
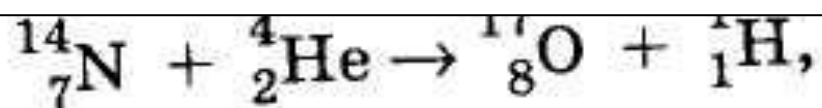


### 13. Относительная атомная масса некоторых изотопов<sup>1</sup>, а. е. м.

| Изотоп                       | Масса<br>нейтрального<br>атома | Изотоп                             | Масса<br>нейтрального<br>атома |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| ${}^1_1\text{H}$ (водород)   | 1,00783                        | ${}^{10}_5\text{B}$ (бор)          | 10,01294                       |
| ${}^2_1\text{H}$ (дейтерий)  | 2,01410                        | ${}^{11}_5\text{B}$ (бор)          | 11,00931                       |
| ${}^3_1\text{H}$ (тритий)    | 3,01605                        | ${}^{12}_6\text{C}$ (углерод)      | 12,00000                       |
| ${}^3_2\text{He}$ (гелий)    | 3,01602                        | ${}^{14}_7\text{N}$ (азот)         | 14,00307                       |
| ${}^4_2\text{He}$ (гелий)    | 4,00260                        | ${}^{15}_7\text{N}$ (азот)         | 15,00011                       |
| ${}^6_3\text{Li}$ (литий)    | 6,01513                        | ${}^{16}_8\text{O}$ (кислород)     | 15,99491                       |
| ${}^7_3\text{Li}$ (литий)    | 7,01601                        | ${}^{17}_8\text{O}$ (кислород)     | 16,99913                       |
| ${}^8_4\text{Be}$ (бериллий) | 8,00531                        | ${}^{27}_{13}\text{Al}$ (алюминий) | 26,98146                       |

<sup>1</sup> Для нахождения массы ядра необходимо вычесть суммарную массу электронов.

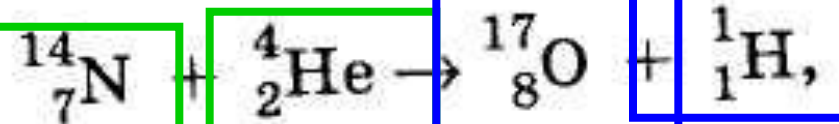
$$\Delta m = \sum M_{\text{ядер}}^{\text{до начала реакции}} - \sum M_{\text{ядер}}^{\text{после окончания реакции}}$$



Для того чтобы ядерная реакция имела положительный энергетический **ВЫХОД**, удельная энергия связи нуклонов в ядрах исходных продуктов должна быть меньше удельной энергии связи нуклонов в ядрах конечных продуктов. Это означает, что величина  $\Delta M$  должна быть положительной

# КАК РЕШИТЬ ЗАДАЧУ ?

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D)c^2 = \Delta M c^2$$



$$\Delta M = (14,00307 + 4,00260) - (16,99913 + 1,00783) = 18,00567 - 18,00696 = -0,00129 < 0$$

Т. к. дефект массы  $< 0$   
энергия поглощается

# КАК РЕШИТЬ ЗАДАЧУ ?

Рассчитать энергетический выход реакции

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D)c^2 = \Delta M c^2$$

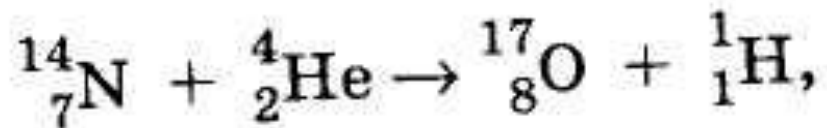
$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \quad 1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

$$Q = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2 / 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \cdot \text{с}^2 = 931 \text{ МэВ}$$

**Q=931 МэВ переводной коэффициент для расчета энергии в МэВ**

$$\Delta M = (14,00307 + 4,00260) - (16,99913 + 1,00783) = 18,00567 - 18,00696 = -0,00129 \text{ а.е.м.}$$

$$Q = -0,00129 \cdot 931 \text{ МэВ} = -1,2 \text{ МэВ}$$



Данная реакция идет с поглощением **1,2 МэВ** энергии



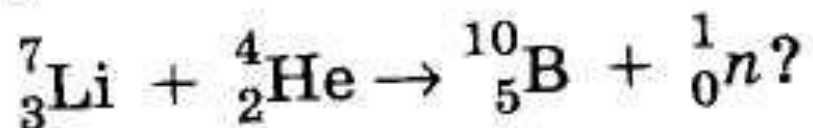
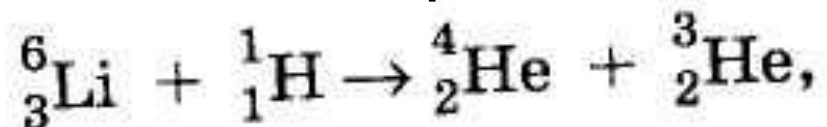
# Домашнее задание

**§ 107, повт. §106,**

**Р. № 1220 закончить, 1221**

**Р. № 1220 закончить:**

Рассчитать энергетический выход реакции



# Энергетический выход ядерной реакции

## Ядерные реакции могут протекать

**-с выделением энергии ( $Q > 0$ ),**

*если  $E_{\text{кин.}}$  ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции.*

удельная энергия связи нуклонов в ядрах исходных продуктов должна быть меньше удельной энергии связи нуклонов в ядрах конечных продуктов.

$\Delta M$  должна быть положительной

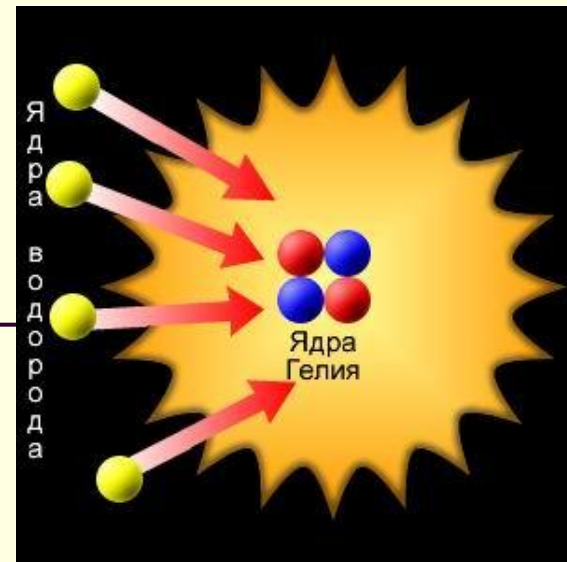
**-с поглощением энергии ( $Q < 0$ ),**

*если  $E_{\text{кин.}}$  ядер и частиц после реакции меньше, чем до реакции.*

1. **Деление тяжелых ядер.** В отличие от радиоактивного распада ядер, сопровождающегося испусканием  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц, реакции деления – это процесс, при котором нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс.
2. **. Термоядерные реакции.** Вторым путем освобождения ядерной энергии связан с реакциями синтеза. При слиянии легких ядер и образовании нового ядра должно выделяться большое количество энергии

# Термоядерные реакции

---



**Термоядерными реакциями называются ядерные реакции синтеза легких ядер в более тяжелые.**

# Термоядерные реакции

---

Термоядерные реакции эффективно **происходят при сверхвысоких температурах порядка  $10^7 - 10^9$  К.**

При термоядерных реакциях **выделяется весьма большая энергия**, превышающая энергию, которая выделяется при делении тяжелых ядер.

- Для слияния легких ядер необходимо преодолеть кулоновское отталкивание протонов в одноименно положительно заряженных ядрах. Для слияния ядер водорода (дейтерия) их надо сблизить на расстояние  $3 \cdot 10^{-15}$  м. Для этого их кинетическая энергия должна быть равна 0,1 МэВ. Это возможно при  $T = 2 \cdot 10^9$  К. Практически по ряду причин температура, необходимая для термоядерных реакций снижается на два порядка и составляет  $10^7$  К.

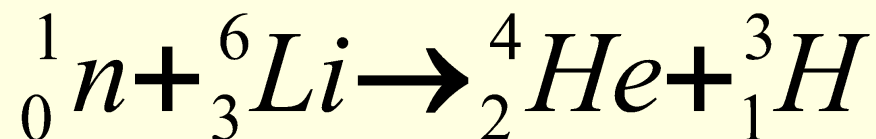
# Термоядерные реакции

---

- Температура порядка  $10^7$  К характерна для центральной части Солнца.
- Спектральный анализ излучения Солнца показал, что в веществе Солнца, как и многих других звезд, имеется до 80% водорода и около 20% гелия. Углерод, азот и кислород составляют не более 1% массы звезд. При огромной массе Солнца количество этих газов достаточно велико.

# Термоядерные реакции

- Осуществление термоядерных реакций в земных условиях создаст огромные возможности для получения энергии.
- Дейтерий, необходимый для наиболее эффективной реакции содержится в воде морей и океанов (в виде молекул  $H_2O$  и  $D_2O$ ). его количества хватит на сотни миллионов лет.
- Тритий можно получать в ядерном реакторе в результате облучения жидкого лития (запасы которого огромны) нейтронами:



# Термоядерные реакции

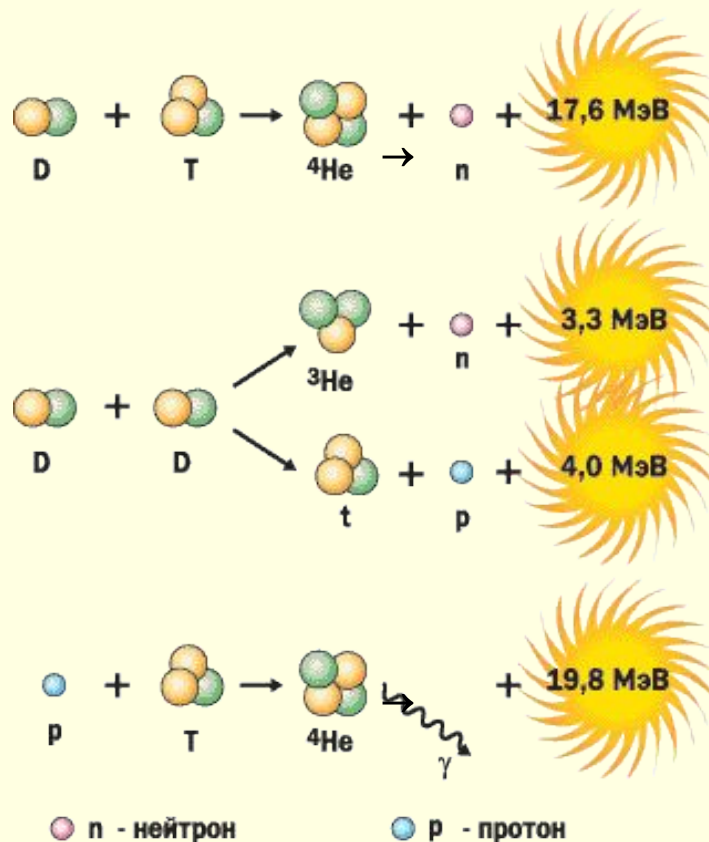
---

- Одним из важнейших преимуществ управляемого термоядерного синтеза является то, что в отличие от реакций деления тяжелых ядер, в результате термоядерного синтеза не образуются радиоактивные отходы.

*Реакторы будущего могут использовать энергию синтеза ядер, протекающую по четырем основным схемам с участием дейтерия (D), трития (T), нейтронов (n) и протонов (p).*

# Термоядерные реакции

*Реакторы будущего могут использовать энергию синтеза ядер, протекающую по четырем основным схемам с участием дейтерия (D), трития (T), нейтронов (n) и протонов (p).*



| Реакция                                    | Энергетический выход, (МэВ) |
|--------------------------------------------|-----------------------------|
| $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$      | 17,6                        |
| $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$      | 3,27                        |
| $D + D \rightarrow T + p$                  | 4.03                        |
| $p + T \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ | 19.8                        |

*Наиболее перспективной считается первая, в которой из 17,6 МэВ энергии 3,5 МэВ уносит  ${}^4\text{He}$ , а 14,1 МэВ - нейтрон. В последней реакции основная доля энергии приходится на гамма-излучение.*

Поэтому представляет большой интерес овладеть этим процессом и на его основе создать дешевый и экологически чистый источник энергии. Однако несмотря на то, что исследованиями управляемого термоядерного синтеза (УТС) заняты большие научно-технические коллективы во многих развитых странах, предстоит решить еще немало сложных проблем, прежде чем промышленное производство термоядерной энергии станет реальностью.

## **Физики-ядерщики подтвердили предсказание второго острова стабильности**

На 235-й национальной встрече Американского химического общества (АХО) академик РАН Юрий Оганесян подтвердил, что физики-ядерщики надеются найти второй остров стабильности химических элементов. Он может лежать очень далеко — вплоть до области элементов с атомным номером около 164, сообщает АХО в своем пресс-релизе.

Элементы с атомным номером (количеством протонов в ядре) выше 92 (трансурановые элементы) имеют сравнительно короткий период полураспада, из-за чего в природе встречаются мало или не встречаются вовсе. Многие искусственно синтезированные сверхтяжелые элементы существуют всего лишь доли секунды.

Согласно одной из гипотез, в трансурановой области периодической таблицы Менделеева существуют так называемые острова стабильности: последовательности элементов, обладающих относительно большим временем жизни. Этой гипотезы придерживаются многие ученые из двух ведущих мировых центров исследования сверхтяжелых элементов: международного Объединенного института ядерного исследований (ОИЯИ; Россия) и Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса (США).

Исследования недавно синтезированных элементов 113, 114, 115, 116 и 118 (элементы с большим атомным номером пока не синтезированы) частично подтвердили гипотезу об островах стабильности: время жизни элементов с номерами 113, 114, 115 и 116 заметно больше, чем у соседних элементов, что согласуется с теоретическими предсказаниями. Ученые работают над синтезом более тяжелых элементов, а также теоретическим поиском второго острова стабильности.

Оганесян, научный руководитель Лаборатории ядерных реакций имени Флерова, поддержал ранее высказывавшуюся гипотезу, что существует и второй остров стабильности, лежащий очень далеко от первого. Удастся ли его достичь в обозримом будущем — непонятно: по некоторым теориям, остров может лежать в области 164-го элемента: такие тяжелые ядра пока не удается ни синтезировать, ни описать теоретически.

# Уран.

---

- Уран - это очень тяжелый (плотный) металл, который может быть использован как источник, содержащий в изобилии концентрированную энергию.
- Он встречается во многих породах в концентрации 2-4 части на миллион, и, как правило, в земной коре. Также встречается в морской воде, и может быть извлечен из океанов в случае значительного роста цен.
- Был открыт в 1789 в минерале, который называется настуран. Был назван в честь планеты Уран, которая была открыта на восемь лет раньше.
- Предположительно, уран был образован в сверх новых (super novae) около 6.6 миллиардов лет назад.
- На сегодня его радиоактивный распад является основным источником тепла внутри земли, вызывая конвекцию и дрейф континентов, в то время как в солнечной системе такого не происходит.
- Температура плавления 1132 С. Химический символ U.

# Атом урана

---

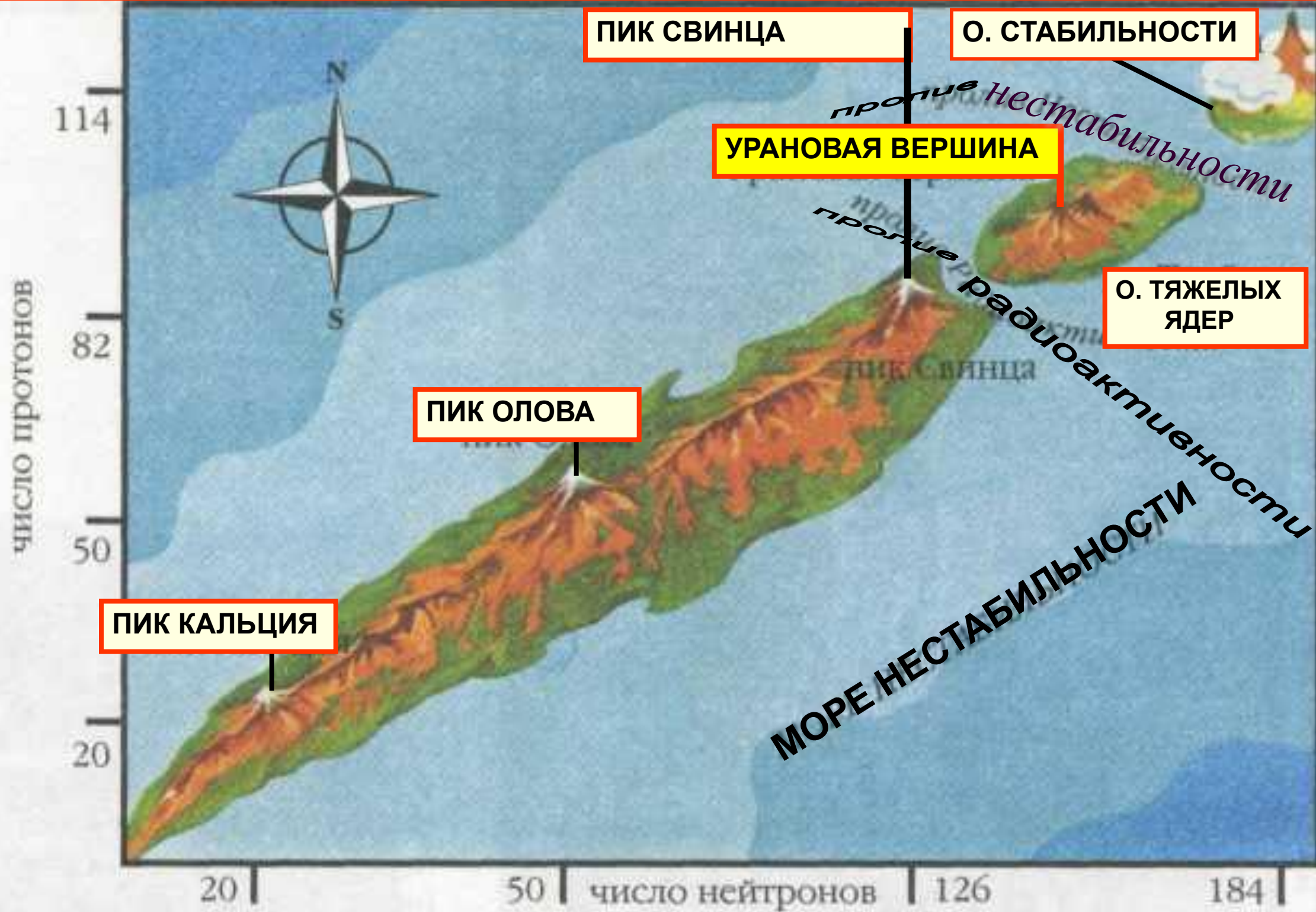
- В масштабе, созданном согласно увеличению массы ядра, уран является самым тяжелым среди всех природных элементов (водород - самый легкий). Удельный вес урана 18.7. Как и другие элементы, уран встречается в слегка различных формах, называемых "изотопами". Эти изотопы отличаются друг от друга количеством частиц (нейтронов) в ядрах. "Природный" уран, встречаемый в земной коре, представляет собой смесь в основном двух изотопов: урана-238 (U-238), около 99.3%, и U-235 около 0.7%.

- Изотоп U-235 важен, потому что при некоторых условиях он легко расщепляется, высвобождая много энергии. Поэтому говорят, что он "делящийся", и используется выражение "ядерное деление". Между тем, как все радиоактивные изотопы, он распадается. U-238 распадается очень медленно, его период полураспада такой же как и возраст земли. Это означает, что он имеет низкую радиоактивность, меньшую, чем у многих других изотопов в породах и песке. Тем не менее, он генерирует 0.1 ватт/тонну, и этого достаточно для обеспечения тепла земной коры.

# Деление урана

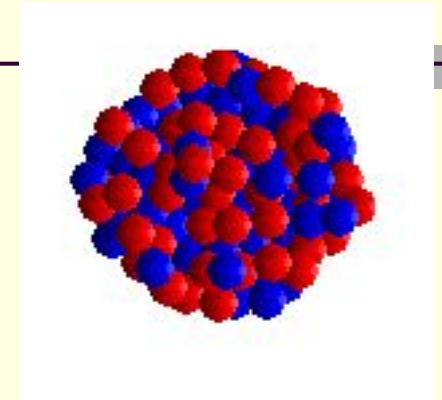
---

- Ядро изотопа урана U-235 состоит из 92 протонов и 143 нейтронов ( $92 + 143 = 235$ ). При делении атома U-235 на две части нейтроном высвобождается некоторая энергия в виде тепла, и выбрасывается 2 или 3 дополнительных нейтрона. Если достаточное количество этих вытесненных нейтронов расщепляет ядра других атомов U-235, высвобождая последующие нейтроны, происходит "цепная реакция". Когда этот процесс повторяется снова и снова, миллионы раз, появляется очень большое количество тепла из относительно небольшого количества урана.
- Именно этот процесс, с эффектом "сгорания" урана, происходит в ядерном реакторе. Тепло используется для того, чтобы пар производил электричество.



# ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА

В **1939г.** - было открыто деление ядер урана при бомбардировке их нейтронами учеными Отто Ханом и Фрицем Шраммом.



Атом урана, поглотив нейтрон, возбуждается , **деформируется** ( ядро вытягивается, ядерные силы **ослабевают** при увеличении расстояний между нуклонами) и **разрывается** на две части с излучением при этом 2-3 нейтронов.



---

Поглощая нейтрон, ядро урана **получает** необходимую энергию для преодоления ядерных сил притяжения между нуклонами, при этом внутренняя энергия ядра **увеличивается**.

При распаде ядра часть внутренней энергии **переходит** в кинетическую энергию осколков, а затем за счет торможения их во **внутреннюю энергию** окружающей **среды**.

Реакция деления ядер урана идет с преобладающим **выделением** энергии. в окружающую среду.

## ■ **Радиоактивность и радиоактивное излучение**

- Уран, торий и некоторые другие элементы обладают свойством непрерывно и без каких-либо внешних воздействий испускать невидимое излучение, которое способно проникать сквозь непрозрачные экраны и оказывать ионизационное и фотографическое действия. Свойство самопроизвольного испускания подобного излучения получило название радиоактивности. Элементы, обладающие этим свойством, называются радиоактивными элементами, а испускаемое ими излучение — радиоактивным излучением.

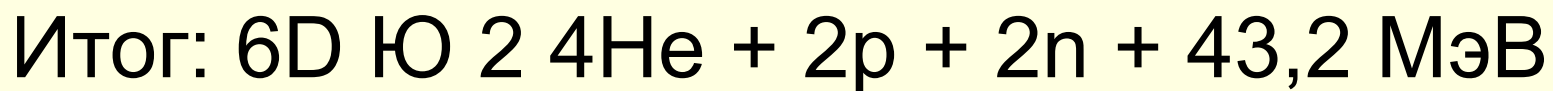
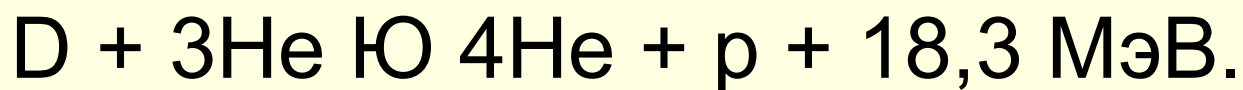
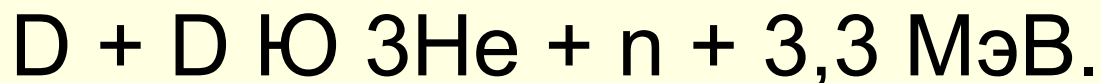
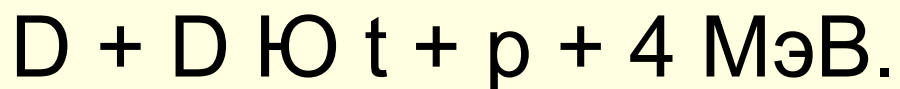
### **Радиоактивный распад и радиоактивные превращения.**

Изучение радиоактивности убеждает нас в том, что радиоактивное излучение испускается атомными ядрами радиоактивных элементов. Испуская  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучение, атомы радиоактивного элемента изменяются, превращаясь в атомы нового элемента. В этом смысле испускание радиоактивных излучений называют радиоактивным распадом. Различают  $\alpha$ -распад — испускание  $\alpha$ -частиц, и  $\beta$ -распад — испускание  $\beta$ -частиц.

### **Деление ядер урана.**

В 1934 г. **Ф. Жолио-Кюри** высказал предположение о возможности использования энергии ядерных реакций в практических целях, если удастся осуществить цепные ядерные реакции. Эта гипотеза получила экспериментальное подтверждение. Частицами, способными к осуществлению цепных реакций, оказались нейтроны. При делении одного ядра урана на два осколка освобождается 2 или 3 нейтрона и выделяется около 200 МэВ энергии. Примерно 165 МэВ выделяется в виде кинетической энергии ядер-осколков, остальная энергия приходится на нейтроны и гамма-кванты. При благоприятных условиях освобождающиеся в первой реакции нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. При делении 3 ядер урана должно освободиться от 6 до 9 новых нейтронов, они попадут в новые ядра урана и т.д.

- \*\* Полный цикл ядерных реакций дейтериевого горения:



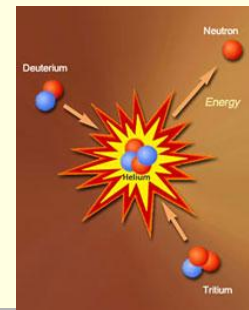
- 
- **Откуда Солнце черпает энергию?**
  - Энергия, заставляющая Солнце светить, вырабатывается в его ядре, где существует огромное давление и температура достигает 15000000 градусов. В таких условиях происходит синтез (слияние) ядер водорода и образование ядер другого элемента - гелия. В результате этого процесса, называемого ядерным синтезом, выделяется громадное количество энергии.

# термоядерный синтез

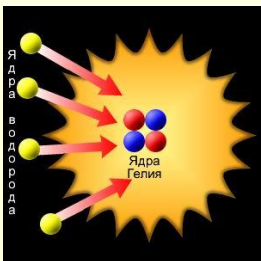
---

Термоядерный синтез, реакция слияния легких атомных ядер в более тяжелые ядра, происходящая при сверхвысокой температуре и сопровождающаяся выделением огромных количеств энергии. Ядерный синтез – это реакция, обратная делению атомов: в последней энергия выделяется за счет расщепления тяжелых ядер на более легкие.

Согласно современным астрофизическим представлениям, основным источником энергии Солнца и других звезд является происходящий в их недрах термоядерный синтез. В земных условиях он осуществляется при взрыве водородной бомбы. Термоядерный синтез сопровождается колоссальным энерговыделением на единицу массы реагирующих веществ (примерно в 10 миллионов раз большим, чем в химических реакциях).



Поэтому представляет большой интерес овладеть этим процессом и на его основе создать дешевый и экологически чистый источник энергии. Однако несмотря на то, что исследованиями управляемого термоядерного синтеза (УТС) заняты большие научно-технические коллективы во многих развитых странах, предстоит решить еще немало сложных проблем, прежде чем промышленное производство термоядерной энергии станет реальностью.



# Зачем это нужно

---

В настоящее время, более 85% энергии производимой человеком получается при сжигании органических топлив - угля, нефти и природного газа. Этот дешевый источник энергии, освоенный человеком около 200 - 300 лет назад, привел к быстрому развитию человеческого общества, его благосостоянию и, как результат, к росту народонаселения Земли. Предполагается, что из-за роста народонаселения и более равномерного потребления энергии по регионам, производство энергии возрастет к 2050 г примерно в три раза по сравнению с нынешним уровнем и достигнет 1021 Дж в год. Не вызывает сомнения, что в обозримом будущем прежний источник энергии - органические топлива - придется заменить на другие виды производства энергии.

- 
- Это произойдет как по причине истощения природных ресурсов, так и по причине загрязнения окружающей среды, которое по оценкам специалистов должно наступить гораздо раньше, чем будут выработаны дешевые природные ресурсы (нынешний способ производства энергии использует атмосферу в качестве помойки, выбрасывая ежедневно 17 млн. тонн углекислого и других газов, сопутствующих сжиганию топлив).

- 
- Переход от органических топлив к широкомасштабной альтернативной энергетике ожидается в середине 21 века. Предполагается, что будущая энергетика будет более широко, чем нынешняя энергетическая система, использовать разнообразные и, в том числе, возобновляемые источники энергии, такие как: солнечная энергия, энергия ветра, гидроэлектроэнергия, выращивание и сжигание биомассы и ядерная энергия. Доля каждого источника энергии в общем производстве энергии будет определяться структурой потребления энергии и экономической эффективностью каждого из этих источников энергии.

- 
- Переход от органических топлив к широкомасштабной альтернативной энергетике ожидается в середине 21 века. Предполагается, что будущая энергетика будет более широко, чем нынешняя энергетическая система, использовать разнообразные и, в том числе, возобновляемые источники энергии, такие как: солнечная энергия, энергия ветра, гидроэлектроэнергия, выращивание и сжигание биомассы и ядерная энергия. Доля каждого источника энергии в общем производстве энергии будет определяться структурой потребления энергии и экономической эффективностью каждого из этих источников энергии.

# Какие преимущества термоядерного синтеза по сравнению с ядерными реакциями деления,?

- Основное и принципиальное отличие заключается в отсутствии долгоживущих радиоактивных отходов, которые характерны для ядерных реакторов деления. И хотя в процессе работы термоядерного реактора первая стенка активируется нейтронами, выбор подходящих низкоактивируемых конструкционных материалов открывает принципиальную возможность создания термоядерного реактора, в котором наведенная активность первой стенки будет снижаться до полностью безопасного уровня за тридцать лет после остановки реактора. Это означает, что выработавший ресурс реактор нужно будет законсервировать всего на 30 лет, после чего материалы могут быть переработаны и использованы в новом реакторе синтеза. Эта ситуация принципиально отличается от реакторов деления, которые производят радиоактивные расходы, требующие переработки и хранения в течении десятков тысяч лет. Кроме низкой радиоактивности, термоядерная энергетика имеет огромные, практически неисчерпаемые запасы топлива и других необходимых материалов, достаточных для производства энергии в течении многих сотен, если не тысяч лет.

- Именно эти преимущества побудили основные ядерные страны начать в середине 50 годов широкомасштабные исследования по управляемому термоядерному синтезу. В Советском Союзе и США к этому времени уже были проведены первые успешные испытания водородных бомб, которые подтвердили принципиальную возможность использования энергии ядерного синтеза в земных условиях. С самого начала стало ясно, что управляемый термоядерный синтез не имеет военного применения. В 1956 г исследования были рассекречены и с тех пор проводятся в рамках широкого международного сотрудничества. Водородная бомба была создана всего за несколько лет, и в то время казалось, что цель близка, и что первые крупные экспериментальные установки, построенные в конце 50 годов, получат термоядерную плазму. Однако, потребовалось более 40 лет исследований для того, чтобы создать условия, при которых выделение термоядерной мощности сравнимо с мощностью нагрева реагирующей смеси. В 1997 г самая крупная термоядерная установка - Европейский ТОКАМАК (JET) получила 16 МВт термоядерной мощности и вплотную подошла к этому порогу.

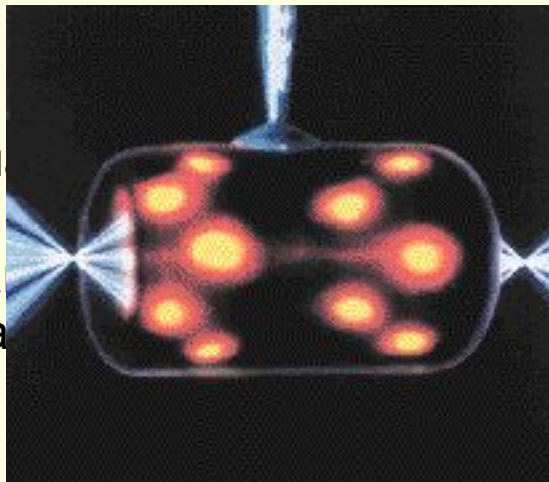
- Что же явилось причиной такой задержки? Оказалось, что для достижения цели физикам и инженерам пришлось решить массу проблем, о которых и не догадывались в начале пути. В течении этих 40 лет была создана наука - физика плазмы, которая позволила понять и описать сложные физические процессы, происходящие в реагирующей смеси. Инженерам потребовалось решить не менее сложные проблемы, в том числе, научиться создавать глубокий вакуум в больших объемах, подобрать и испытать подходящие конструкционные материалы, разработать большие сверхпроводящие магниты, мощные лазеры и источники рентгеновского излучения, разработать импульсные системы питания, способные создавать мощные пучки частиц, разработать методы высокочастотного нагрева смеси и многое другое.

Ядерные реакции, представляющие  
интерес для управляемого  
термоядерного синтеза

---

- Все реакции, приведенные в Таблице 1, кроме последней, происходят с выделением энергии в виде кинетической энергии продуктов реакций,  $q$ , которая указана в скобках в единицах миллионов электронвольт (МэВ). В физике плазмы принято мерить энергию в электронвольтах. Один электронвольт это такая энергия, которую приобретет электрон, ускоряясь в разнице потенциалов в один вольт. Т.к. заряд электрона равен  $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а энергия электрона, ускоряющегося в электрическом поле равна  $E = qU$ , то  $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 11600 \text{ }^\circ\text{К}$ . Две последние реакции играют особую роль в управляемом термоядерном синтезе - они будут использоваться для производства трития, которого практически не существует в природе.

к холраума, освещенного десятью луч  
новной схемой сжатия при использова  
использова



нь находится внутри кожуха и поэтому  
ые имеют большой пробег в веществе  
ия мишени.

- Установка ГОЛ-3
- (Гофрированная Открытая Ловушка)
- Институт Ядерной Физики имени Г.И.Будкера
- Установка ГОЛ-3 была создана для изучения важных физических проблем, связанных с созданием термоядерной плазмы с помощью нагрева электронным пучком и ее удержанием в длинных многопробочных магнитных системах открытого типа. В числе исследуемых вопросов - пучковый нагрев плотной плазмы, многопробочное удержание ионной компоненты плазмы, продольные потери энергии за счет электронной теплопроводности, стеночное удержание плотной плазмы, использование плазмы тяжелых элементов для создания лазеров в ультрафиолетовом диапазоне, исследование эрозии и модификации твердотельных материалов при воздействии мощных плазменных и электронных потоков.

# Импульсные системы

- Установки
- (Гофрированные)
- Институт
- Установки для исследования физических процессов в плазме, удержания плазмы, систематизации пучковых удержаний, потери энергии, стеночные плазмы

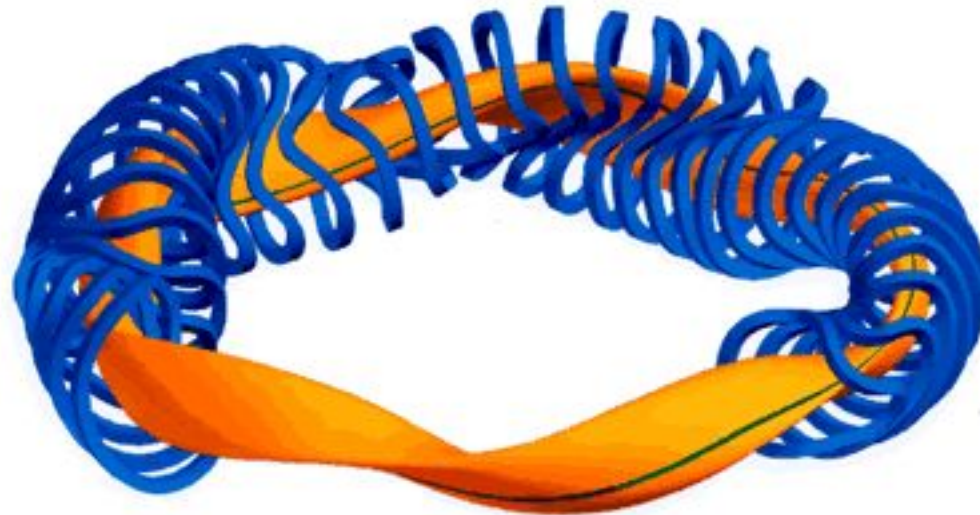


ультрафиолетовом диапазоне, исследование эрозии и модификации твердых материалов при воздействии мощных плазменных и электронных потоков.

важных  
термоядерной  
ком и ее  
нитных  
ых вопросов -  
точное  
ольные  
оводности,  
льзование  
зеров в

# Системы с магнитным удержанием плазмы

- Стелларатор — тип реактора для осуществления управляемого термоядерного синтеза. Изобретен Л. Спитцем, который предположил, что плазма должна двигаться по спирали, подобно частицам в магнитном поле звезды.



- Модульные магнитные катушки и плазма СТЕЛЛАТОРА.

# Токамак



- токамаке плазма изолируется от стенок камеры с помощью магнитного поля. Магнитное поле в токамаке является результирующей суммой магнитных полей:
- 1. Тороидальные катушки создают продольное магнитное поле вдоль оси тора (оно направлено как плазменный шнур, см. рис.).
- 2. Ток текущей по плазме создает магнитное поле вокруг себя (оно направлено как тороидальные катушки см. рис.)
- В результате суммы этих двух полей получается винтовое магнитное поле, показанное на рисунке.
- Однако, как оказалось этого не достаточно. При такой конфигурации на частицы действует сила, направленная по большому радиусу тора, и плазменный шнур разлетелся бы.
- 3. Что бы подавить эту силу используется магнитное поле создаваемое полоидальными витками - полоидальное магнитное поле,  $B_p$ , направленное вдоль малого обхода тора.

- Результирующее магнитное поле имеет силовые линии в виде бесконечных спиралей, охватывающих центральную линию плазменного тора - магнитную ось. Таким образом, силовые линии магнитного поля образуют в ТОКАМАКе замкнутые, вложенные друг в друга тороидальные магнитные поверхности. Ток в плазме поддерживается вихревым электрическим полем, создаваемым первичной обмоткой индуктора. При этом, плазменный виток играет роль вторичной обмотки. По сути это обычный трансформатор, вторичную обмотку которой представляет плазменный шнур. Очевидно, что индукционное поддержание тока в ТОКАМАКе ограничено запасом потока магнитного поля в первичной обмотке и возможно лишь в течении конечного времени. Кроме тороидальных катушек и первичной обмотки индуктора в ТОКАМАКе должны быть полоидальные обмотки, которые нужны для поддержания равновесия плазмы и контроля ее положения в камере. Токи, текущие в полоидальных катушках создают электромагнитные силы действующие на плазменный ток и таким образом могут изменить ее положение в камере и форму сечения плазменного шнура.



**СПАСИБО ЗА УРОК**

