

## Верижна реакция

$^{235}\text{U}$  излъчва средно 2,5 бързи неутрона при делене.  
 $n$  - брой неутрони, възникващи при един акт на делене  
при  $n > 1 \rightarrow$  възможност за верижна реакция:

след първото делене имаме  $n$  неутрона,  
след второто делене –  $(n \cdot n) = n^2$ ,  
след третото –  $n^3$  и т. н.

Броят на неутроните ще расте като геометрична прогресия, ако няма загуби на неутрони при забавянето им до топлинни скорости и всички се поглъщат от  $^{235}\text{U}$  с последвало делене! Отделената при деленето енергия също расте като геометрична прогресия.

При *верижната реакция* се отделя огромна енергия за много късо време!  
Чрез контролиране на броя неутрони е възможно бавно отделяне на енергия, която да се превръща в електроенергия.

За верижна реакция  $N_i > N_{i-1}$ .

*Коефициент на възпроизводство*

$$k = N_i / N_{i-1}$$

$k = 1$  - критична;  $k \approx 1$  верижната реакция е управляема

$k > 1$  - надкритична – избухва с огромна енергия

$k < 1$  - подкритична - верижната реакция затихва

Означаваме с  $\Delta N = (N_i - N_{i-1})$  нарастването на броя неутрони

$$\text{Тогава } k - 1 = \frac{N_i - N_{i-1}}{N_{i-1}} = \frac{\Delta N}{N_{i-1}} \text{ и } \Delta N = N(k - 1)$$

Нека  $\tau$  е времето между две последователни деления, нарастването на неутроните за единица време ще бъде

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\Delta N}{\tau} = \frac{N(k-1)}{\tau}, \text{ откъдето } \frac{dN}{N} = \frac{(k-1)}{\tau} dt.$$

Интегрираме с начални условия: в  $t = 0$   $N = N_0$  и

$$N = N_0 \exp\left(\frac{k-1}{\tau} t\right)$$

При  $k > 1$   $N$  расте експоненциално с времето!

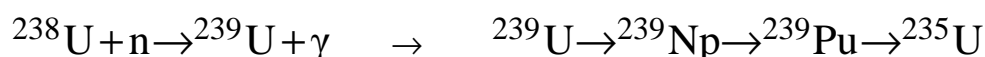
В естествен уран (99,27 % е  $^{238}\text{U}$ , а 0,72 % –  $^{235}\text{U}$ )  $k < 1$ , реакцията е подкритична. Кога е възможно да възникне верижна реакция? Високо сечение за делене има само  $^{235}\text{U}$  за топлинни неутрони?

$k$  се изчислява с отчитане на всички процеси при движение на бързия неутрон от създаването му до неговото поглъщане от  $^{235}\text{U}$  като бавен неутрон.

Неутрони се губят при следните процеси:

- излизане на бързия неутрон от средата, ако тя не е безкрайна
- в процеса на забавяне неутронът може да се погълне от  $^{238}\text{U}$  преди да достигне до топлинни скорости
- той може да се погълне от ядро на примеси или забавител
- вероятността за поглъщане на топлинния неутрон от  $^{235}\text{U}$  не е 100%.

При поглъщане на бърз неутрон от  $^{238}\text{U}$  не се достига до делене, а протича реакция от типа  $(n, \gamma)$



Крайното ядро е  $^{235}\text{U}$ , но периодът на  $^{239}\text{Pu}$  е  $1,4 \cdot 10^4$  у! Не може да се произвежда  $^{235}\text{U}$  от  $^{238}\text{U}$  - при общия баланс такъв неутрон се губи.

Нека  $n$  е броят неутрони, излъчени при един акт на делене, а  $p$  – вероятността неутронът да се забави без да се захване от  $^{238}\text{U}$ .

$N_0 p$  неутрона достигат до топлинни скорости

$f$  - вероятност топлинният неутрон да се залови от  $^{235}\text{U}$

при всяко делене се появяват  $N_0 p f n$  бързи неутрона

Коефициентът на възпроизводство  $k = N_i / N_{i-1}$  за среда с безкрайно големи размери ще бъде

$$k_{\infty} = p f n$$

$^{238}\text{U}$  може да се дели от бързи неутрони с вероятност  $\epsilon$ . Тогава

$$k_{\infty} = n \epsilon p f \quad - \text{формула с четири множителя}$$

$k_{\infty}$  дава най-голямата стойност на  $k$  (безкрайна среда). В реална среда с крайни размери  $k < k_{\infty}$ .  $k$  може да се увеличи с поставяне на отражател за неутрони по границите на средата и  $k \sim k_{\infty}$ .

Четири множителя се определят от свойствата на делящия се материал и на забавителя, през които минават неутроните:

\*  $p$  се увеличава чрез забавител (moderator) на неутроните. Ефективно забавяне става от леки ядра, с маса възможно най-близка до тази на неутрона, с минимален брой удари да се достигне до топлинни скорости. Забавителят трябва е с възможно най-ниско сечение за поглъщане на топлинни неутрони. Множителят  $p$  се определя от вида на забавителя и от наличие на примеси в него с високо сечение за поглъщане на неутрони. Примеси може да има и в урана, пречистването му от примеси повишава  $p$ .

Нека  $b = \frac{\text{КОЛИЧЕСТВО ЗАБАВИТЕЛ}}{\text{КОЛИЧЕСТВО УРАН}}$  , а  $k = k_{\max}$  за дадено оптимално отношение  $b_{\text{опт}}$ .

забавител	$b_{\text{опт}} = \frac{\text{КОЛИЧЕСТВО ЗАБАВИТЕЛ}}{\text{КОЛИЧЕСТВО УРАН}}$	$k_{\max}$
обикновена вода (H <sub>2</sub> O)	5,7	0,62
берилий (Be)	340	0,66
графит (C)	440	0,84
тежка вода (D <sub>2</sub> O)	170	1,33

Данните са за естествен уран → извод: *верижна реакция в естествен уран може да протече само ако се използва забавител тежка вода.*

\*  $f$  зависи от обогатяването на урана в топливото с  $^{235}\text{U}$

Контролируема верижна реакция – реактори

1942 г. - Ферми построява първия реактор - доказва възможността за контролируема верижна реакция

Възможността за верижна реакция, т.е.  $k = k_{\max}$  зависи от размерите на средата, в която протича реакцията.  $k$  за крайна среда се изчислява като  $k_{\infty}$  се умножи с параметър, който зависи от размерите и формата на средата.

Минималният размер на реактор с естествен уран, който поддържа верижната реакция, се нарича *критичен размер*.

Стойностите на  $k_{\max}$  са за хомогенна среда (равномерно разпределени уран и забавител).

Но ако уранът е на блокчета или пръти, между които се намира забавител, резонансното поглъщане от  $^{238}\text{U}$  може да се намали – увеличава се множителя  $p$  . В повърхностния слой на урана, до който достигат забавените неутрони може да стане резонансно поглъщане. След този слой влезлите в урана неутрони са с топлинни скорости. В нехомогенния реактор  $f$  намалява, но  $pf$  се увеличава - нараства и  $k$ .

Размерите и формата на реактора са съществени за неутронния баланс.

Важно е отношението  $\frac{\text{ПОВЪРХНОСТ}}{\text{ОБЕМ}}$  на реактора - неутроните се генерират в обема, а излизат през повърхността

за сферичен реактор с радиус  $R$  това отношение е  $1/R$  ,

а за кубичен реактор със страна на куба  $L$  –  $1/L$ .

При критичен размер на реактора броят на излезлите през повърхността неутрони се компенсират от генерираните в обема. Ако  $\bar{l}$  е средният пробег на

неутрона от раждането до залавянето му от уран, критичната дължина на реактор с форма на куб е

$$L = \frac{l}{\sqrt{k-1}}.$$

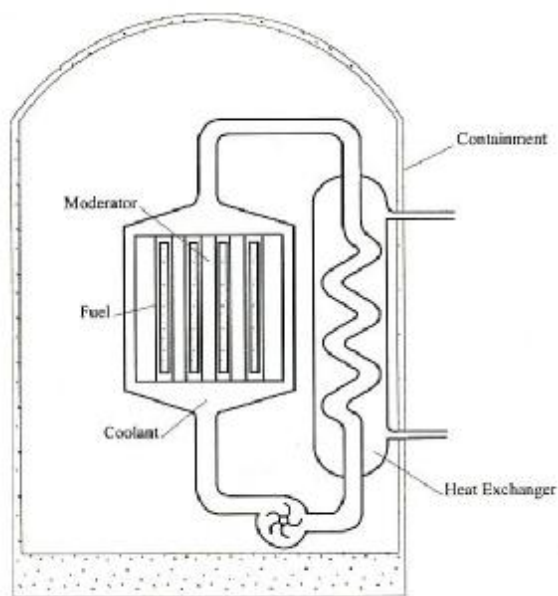
За  $l = 3,5$  m и  $k = 1,06$  критичният размер на реактора е  $L = 10$  m. Размерът на реактора може да бъде намален с поставяне на отражател за неутроните.

Контрол на верижната реакция - чрез количеството неутрони. Ако в активната зона на реактора се внесе материал с голямо сечение за поглъщане на неутрони (напр. кадмий и бор), верижната реакция може да затихне: кадмиеви пръти в активната зона или бор във водата-забавител.

Основни елементи на реактора:

- гориво (делящ се материал)
- забавител за термализиране на неутроните
- отражател за неутрони около активната зона
- корпус
- защита
- управляваща система
- аварийна система

Видове реактори: енергийни, експериментални, изследователски, конвертори, бридери, за производство на радиоактивни изотопи.

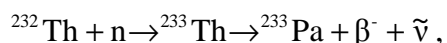


Горивото обикновено е уранов двуокис във формата на таблетки, поставени в циркониева тръба. Няколко такива тръби са поставени в по-широка тръба, в която циркулира охлаждаща вода (първи контур), която се отвежда в контейнер, където предава топлината си на друга циркулираща в него вода (втори контур). Водата от втори контур отива към турбините за производство на електроенергия.

Горивото обикновено е  $^{235}\text{U}$  - естествен уран или уран с

малко обогатяване (до 3 %) на  $^{235}\text{U}$ .

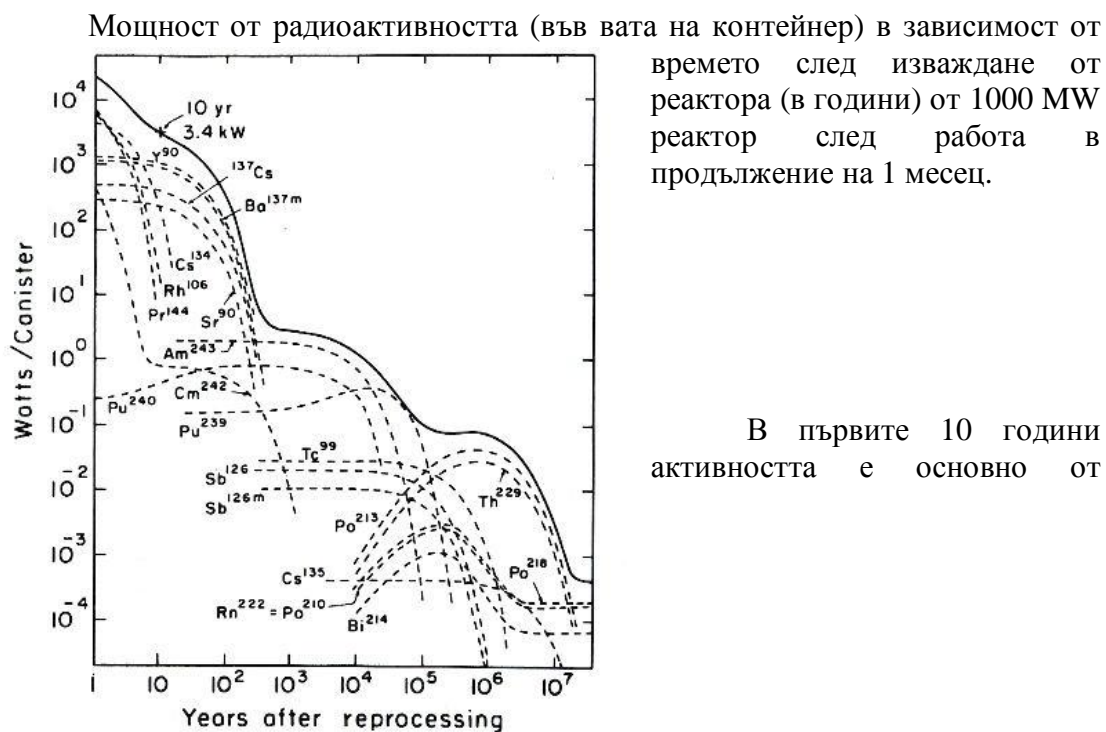
Реактори – конвертори: в реактори с гориво  $^{232}\text{Th}$  се произвежда  $^{233}\text{U}$  :



Чрез топлинен неутрон торият се превръща след  $\beta$ -разпадане с период 22 min в протактиний, който пък с период от 27 d се превръща в  $^{233}\text{U}$ , който също е реакторно гориво. Това конвертиране на евтиния естествен материал  $^{232}\text{Th}$  в гориво  $^{233}\text{U}$  е по-евтино от обогатяването на естествения уран.

Днес работят около 430 ядрени електроцентрали, които в някои държави произвеждат повече от половината електроенергия (във Франция 75 %).

Сериозен проблем на ядрената енергетика са ядрените отпадъци. Отработеното гориво трябва да се складира на безопасно място и в специални контейнери с малък размер. Всички продукти на деленето са радиоактивни с различни периоди на разпадане. Радиоактивни са и актинидите, които също се създават в реакторите или присъстват в урановото гориво



$^{90}\text{Y}$ ,  $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{144}\text{Pr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  - продуктите на делене, след стотици години основната радиоактивност на отпадъците е от актинидите (намалела с няколко порядъка).

#### Ядрени оръжия

Верижна реакция с  $k > 1$  Първо изпробвани в пустиня в Ню Мексико, а след това над Херушима и Наказаки, на 6 и 9 август 1945 г. Тези първи бомби са направени с високо обогатен материал от  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . При силно обогатен дялящ се материал може с малко количество да се достигне до критична маса (критична маса е масата на обем от дялящ се материал с критичен размер, за който  $k > 1$ ). В бомбата има две или повече парчета от силно обогатен дялящ се материал с подкритична маса. С обикновен малък взрив те се събират заедно и започва верижна реакция с отделяне на огромна енергия във вид на светлинна и

взривна вълна и образуване на огромен силно радиоактивен облак с форма на гъба.

### Ядрен синтез

Ядреният синтез - сливане на две леки ядра с получаване на ново ядро (сумарна маса) като се отделя енергия равна на разликата в енергиите на свързване на новото ядро и сумарната на началните леки ядра. Реакцията на ядрен синтез е екзоенергетична - дава възможност за извличане на енергия от сливане на две ядра - алтернатива за ядрената енергетика. Тя е привлекателна поради неограниченото количество на най-леките ядра (водород и неговия изотоп деутерий) в природата и заради липсата на дългоживущи радиоактивни отпадъци при ядрения синтез.

За сливане на две ядра е необходимо те да са в обхвата на ядрените сили ( $10^{-15}$  m) – преодоляване на кулоновата потенциална бариера между двата положителни заряда.

Енергия на активация

$$E_a = |Q_{\text{сл}} - V_{\text{кул}}|.$$

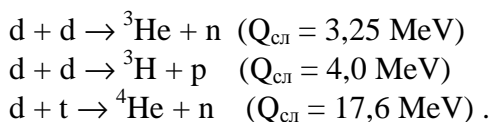
За леки ядра  $E_a \sim 1-5$  MeV. Използването на ускорители или нагряване до висока температура - процес на *термоядрен синтез*. В звездите протича термоядрен синтез (температурата достига милиони градуси).

Оценка за необходимата температура:  $E_{\text{кин}} \sim kT$

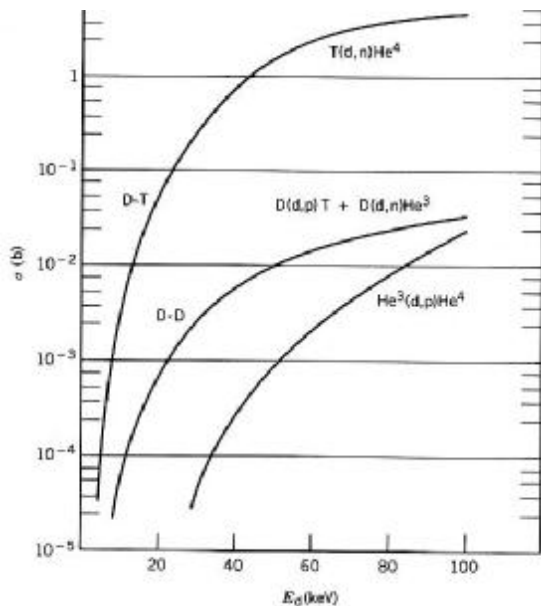
$$T = \frac{E_{\text{кин}}}{k} = \frac{10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ eV} \cdot \text{J/eV}}{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}} \sim 10^{10} \text{ K} \sim 10^8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Твърде висока за контролируем термоядрен синтез в земни условия. Скоростите на ядрата в среда имат максвелово разпределение и ако средната скорост съответства на  $10^7$  K, съществуват ядра със значително по-високи скорости и съответно с порядък по-високи енергии. Увеличава се вероятността за тунелен преход през кулоновата бариера с увеличаване на температурата. При  $T \sim 10^7$  K тя е  $10^{47}$  пъти по-висока от тази при  $T \sim 10^5$  K.

Реакции на сливане:



И трите реакции са екзоенергетични, но при третата от тях се отделя особено висока енергия, благодарение на образуването на  $\alpha$ -частица (енергия на свързване от около 28 MeV). Тази реакция е най-подходяща за управляем термоядрен синтез - кулоновата бариера за тази реакция е с най-малка височина, а отделената енергия е най-висока. Недостатък - основната част от освободената



енергия (14,1 MeV) се предава на нейтрона и е трудно да се извлече, защото нейтроните веднага напускат работния обем.

Кулоновата бариера е

$$V_{\text{кул}} = k_0 e^2 \frac{Z_a Z_A}{R_a + R_A}$$

Вероятността за реакцията (сечението) при ниски енергии се

определя от прозрачността на бариерата, както и при  $\alpha$ -разпадането. Процесът е тунелен преход през потенциалната бариера.

Сечението за реакцията се определя от относителната скорост на двете ядра,  $v$ :

$$\sigma \sim \frac{1}{v^2} \exp(-2G)$$

Експонентата дава прозрачността на бариерата, а  $G$  е фактора на Гамов (известен от  $\alpha$ -разпада)

$$G \cong k_0 e^2 \frac{\pi Z_a Z_A}{\hbar v}$$

Изчислените сечения за трите реакции показват, че сечението за реакцията  $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$  при енергии на деутроните 80-100 keV е с два до три порядъка по-високо от това за другите реакции.

#### Реакции на сливане в звездите

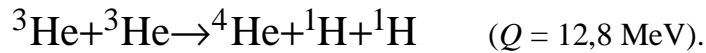
От Големия взрив до днес са изминали около 15 милиарда години. Възрастта на земната кора се оценява на 200 милиона години. Слънцето е постоянен и стабилен източник на енергия за цялото това време. Температурата на слънчевата повърхност (фотосферата) е около 6000 °C с частична йонизация 0,01 %, но във вътрешността на Слънцето температурата е около  $10^7$  °C, а плътността е  $\sim 100 \text{ g/cm}^3$  като 80 % от веществото е водород с почти пълна йонизация (99 %). Всяка секунда Слънцето излъчва енергия, еквивалентна на  $4 \cdot 10^6$  тона.

Предложени са два механизма за реакции с бавно горене, в които от четири протона се получава хелиево ядро.

*Протон-протонният цикъл* е първата възможна последователност от реакции. Първата реакция протича под действие на слабото взаимодействие



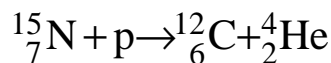
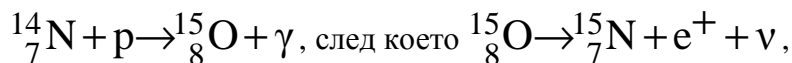
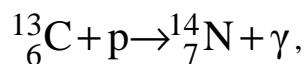
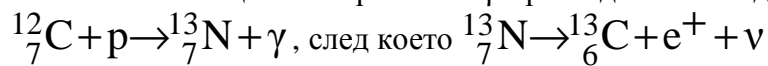
след което е възможно сливането на две ядра  ${}^3\text{He}$



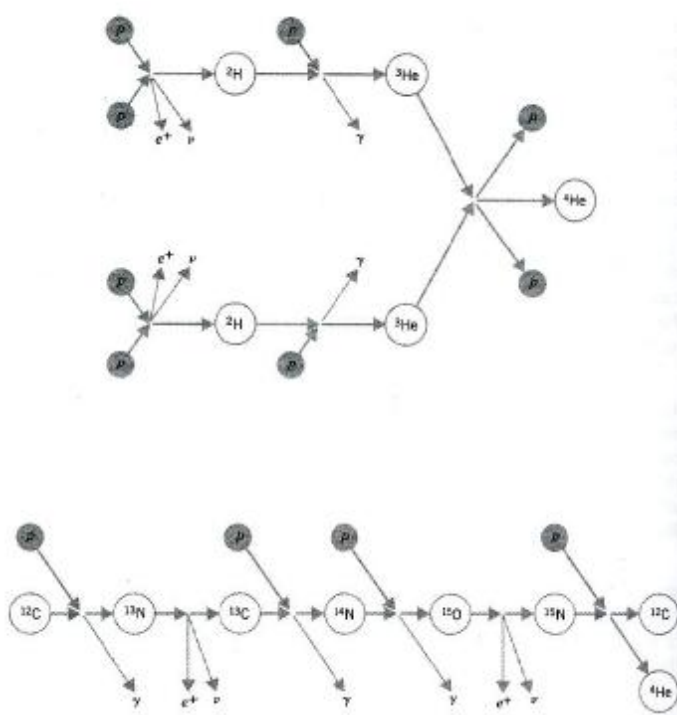
- от четири протона се образува  $\alpha$ -частица. Този процес е бавен, защото зависи от скоростта на първата реакция, протичаща под действие на слабото взаимодействие. Другите две реакции са забавени поради наличието на кулоновата бариера.

Кулоновата бариера за сливането на два протона е от около 700 keV ( $T \sim 10^9$  K). Температурата в Слънцето е с два порядъка по-ниска, но тази реакция все пак се извършва благодарение на огромния брой протони, които могат да си взаимодействат.

*Въглеродно-азотен цикъл (CNO):* ядрото на  ${}^{12}\text{C}$  е като „катализатор“, превръщайки се при сливане с протон последователно в  ${}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{13}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{15}\text{O}$  и  ${}^{15}\text{N}$  след излъчване на  $\alpha$ -частица отново се получава изходното ядро  ${}^{12}\text{C}$ . Последователността от поглъщане на протони и  $\beta^+$ -разпадания е следната:



- отново от четири протона се образува  $\alpha$ -частица, но с посредничеството на по-тежките ядра, започвайки от  ${}^{12}\text{C}$ . При всяка от тези реакции се отделя енергия във вид на  $\gamma$ -лъчи и кинетична енергия на продукта, енергия се отделя и при  $\beta^+$ -разпаданията. Въвличането на две разпадания под действие на слабото взаимодействие прави процесът бавен.



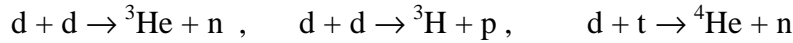
При образуването на 1 граматом (4 g)  ${}^4\text{He}$  се отделя енергия около  $10^9$  W.



### Термоядрени оръжия

Енергията от една атомна бомба, напр. с  $^{235}\text{U}$  се отделя за много късо време ( $10^{-6}$  s) и температурата в малкия обем на бомбата може да достигне до необходимата за термоядрена реакция на сливане.

В една термоядрена бомба се поставя ядрена бомба и пластини от LiT или LiD. При рязкото повишаване на температурата най-напред започват трите реакции,



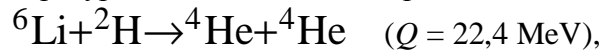
с отделяне на висока енергия. При първите две се генерира тритий и количеството му в сместа не намалява.

Неутроните от верижната реакция и от тези реакции превръщат лития в тритий

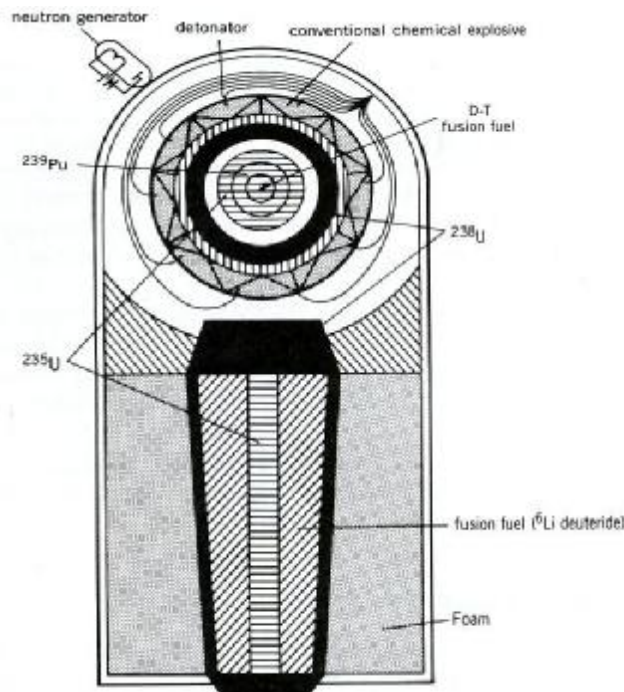


Полученият тритий от първите реакции е с достатъчно висока енергия (2,7 MeV), за да прониква през кулоновата бариера за сливане с деутерия. Тази реакция играе важна роля, тъй като с нея се генерира тритий.

При достигане на температура  $3 \times 10^6$  °C започва и реакцията



- отделя се още по-висока енергия, тъй като се получават две  $\alpha$ -частици.



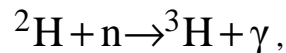
Химически експлозив предизвиква компресия на обвивката от  $^{238}\text{U}$  около  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  - достига се до критична маса и започва неуправляема верижна реакция. Реакцията се подсилва от малко количество смес D-T в центъра на сферата, което внася допълнителни неутрони за верижната реакция. Рентгеновите и  $\gamma$ -лъчите от деленето предизвикват изпарение на полистиреновата пяна и компресия на отражателя от  $^{238}\text{U}$  на основното термоядрено гориво (литиев деутерит).  $^{238}\text{U}$  започва да

се дели от бързи неутрони и температурата се повишава до необходимата за термоядрен взрив. Отделените при сливането неутрони предизвикват верижната реакция на цялото количество  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ , с което се достига пълната мощност на бомбата.

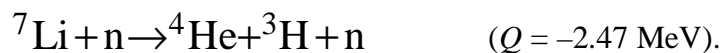
Първите термоядрени бомби са разработени в началото на 50-те години и са с мощ около три порядъка по-голяма от тази на първите ядрени бомби.

Управляем термоядрен синтез

Управляем термоядрен синтез - най-привлекателната перспектива за енергетиката. В земната хидросфера има  $2,5 \cdot 10^{12}$  тона деутерий, което изглежда почти неизчерпаем запас. Тритий също се образува непрекъснато от деутерия в океаните под действие на неутроните от космичното лъчение по реакцията



но поради краткия период на полуразпадане (12,6 у) в природата няма тритий. За да се използва реакцията D-T с отделяне на най-висока енергия, е необходим и тритий, което може да стане чрез подходяща ядрена реакция, напр. реакцията

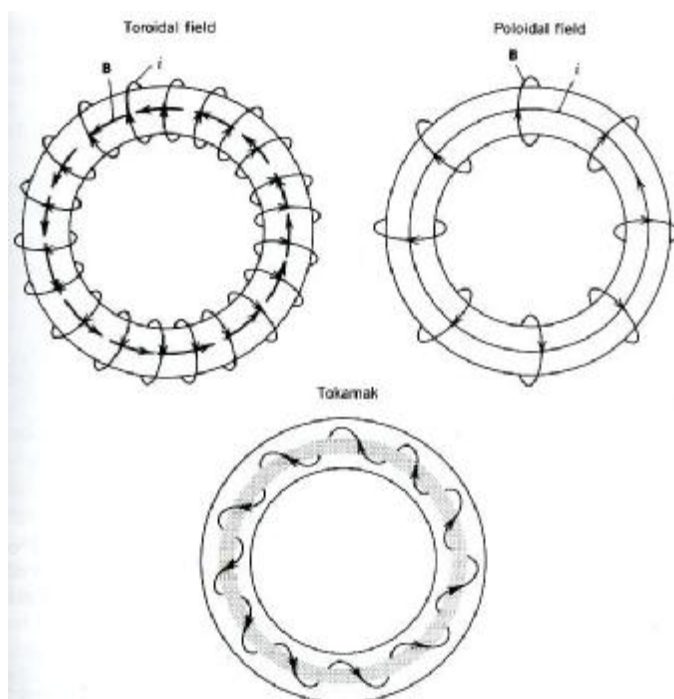


Разработката на системи за управляем термоядрен синтез продължава вече почти 50 години, но засега не е достигнато необходимото развитие за производство на електроенергия.

Основен проблем са високите температури, които трябва да се създадат и поддържат в определен работен обем, задържане на горещата плазма достатъчно дълго време в този обем и отвеждане на отделената енергия.

Ще разгледаме само едно от направленията за постигане на управляем термоядрен синтез, на магнитното удържане. Заредените частици се движат по закривени траектории и би могло да се създаде такова магнитно поле, че частиците да обикалят по затворени орбити без да излизат от него.

ТОКАМАК (ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками) - стоманена камера с формата на тороид, а полето се създава от намотки около тороида. В тази камера под висок вакуум се инжектира смес от деутерий и тритий. Сместа се нагрява до температура около  $10^8$  К чрез радиочестотни вълни, облъчващи плазмата и отделящи електроните, така че водородните ядра да започнат удари едно с друго. Това индуцира тороидален ток от порядъка на няколко МА.



Друг начин да се нагрее плазмата е да се инжектира струя от неутрален деутерий и тритиеви йони с енергия ~ няколко десетки keV, които бързо отдават енергията си на плазмата. Плазменият ток създава магнитно поле с показаната форма (б) и комбинираното действие на двете полета (в).

Основната част на отделената енергия отива за кинетична енергия на неутроните. Те трябва да

бъдат спрени в някаква преграда, напр. стените на камерата, и там да отдадат енергията си, която след това отива за загряване на водата или парата на турбините.

Принципна схема на един бъдещ термоядрен реактор - литият играе ролята на охладител и същевременно генератор на тритий. В него неутроните се забавят и го нагряват, а горещият литий се охлажда в топлообменник. Охладеният литий се връща обратно в обема около работната камера като по пътя чрез сепаратор се отделя генерираният тритий, който постъпва в работната смес. Принципна схема на един бъдещ термоядрен реактор - литият играе ролята на охладител и същевременно генератор на тритий. В него неутроните се забавят и го нагряват, а горещият литий се охлажда в топлообменник. Охладеният литий се връща обратно в обема около работната камера като по пътя чрез сепаратор се отделя генерираният тритий, който постъпва в работната смес.

