



ВРСТЕ РЕАКТОРА

Филозофски факултет за физичку хемију Београд

- Најчешћи енергетски реактори
- Снага 200 MWe – 1500 MWe
- Четири генерације реактора
 - Прва генерација – педесетих година прошлог века. Само један у функцији (Wylfa PS, GB)
 - Друга генерација – комерцијални реактори
 - PWR ВВЕР
 - CANDU РБМК
 - BWR
 - AGR

- Трећа генерација – унапређења друге генерације у погледу производње и искоришћења горива и безбедности.

- ABWR
- AP-600
- CANDU6

- III+ генерација – унапређење пасивних безбедносних мера

- BBER-1000
- ACR-1000 (Advanced CANDU)

AP1000

ESBWR

- Четврта генерација–сложена постројења која ће у свом склопу имати оплодни реактор, енергетске реактор и постројење за прераду горива

Физичку хемију Београд

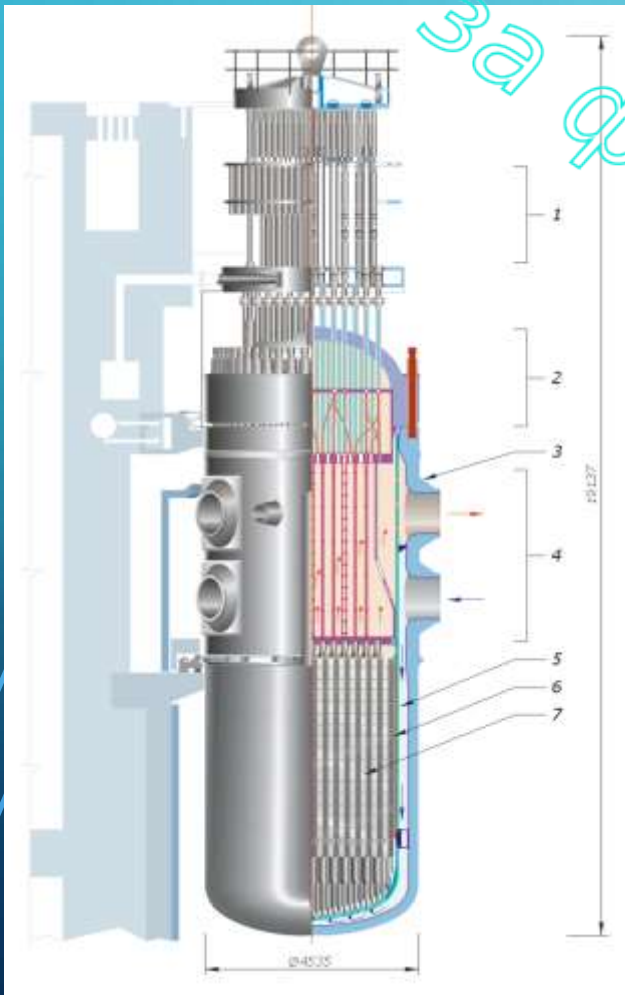
PWR РЕАКТОРИ

- PWR, ВВЭР, PHWR (CANDU).
- Замена горива/“генералка” једном годишње
- Проблеми код PWR
 - дефекти у цевима у секундарном колу хлађења
 - Дефекти између вођица контролних шипки на капи реактора
- ВВЭР (*Водо–водяной энергетический реактор*)
 - Нема containment
 - Велика запремина карбид

контролне шипке
челик + бор

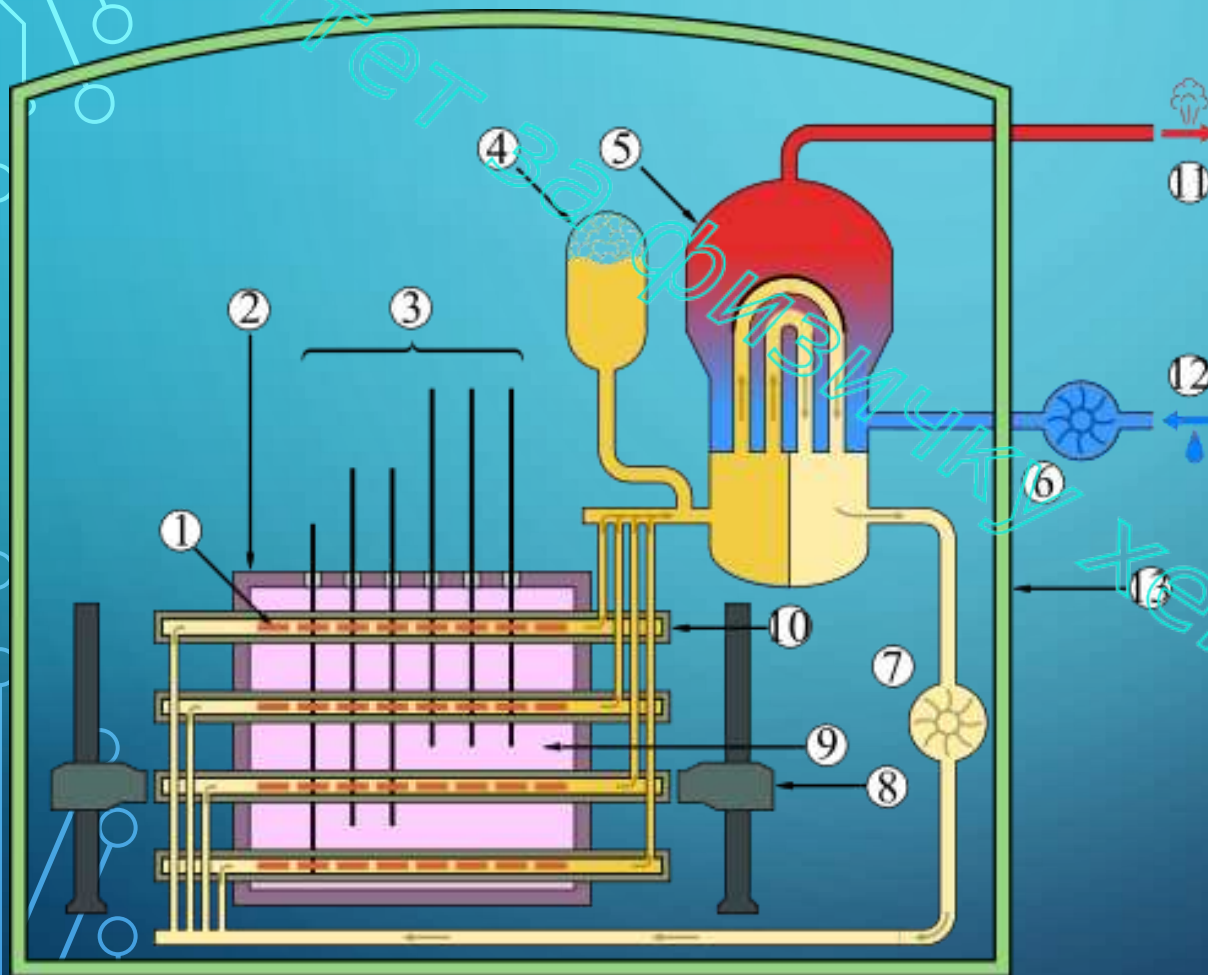
ВВЭР

- Снага 400–1500 MW
- У земљама бившег Варшавског пакта, Финској



1. Механизам за покретање контролних шипки
2. Капа реактора
3. Тело реактора
4. Улаз и излаз воде за хлађење
5. Језгро реактора
6. Заштита активне зоне
7. Слогови горива
8. Контролне шипке

CANADA DEUTERIUM URANIUM REACTOR

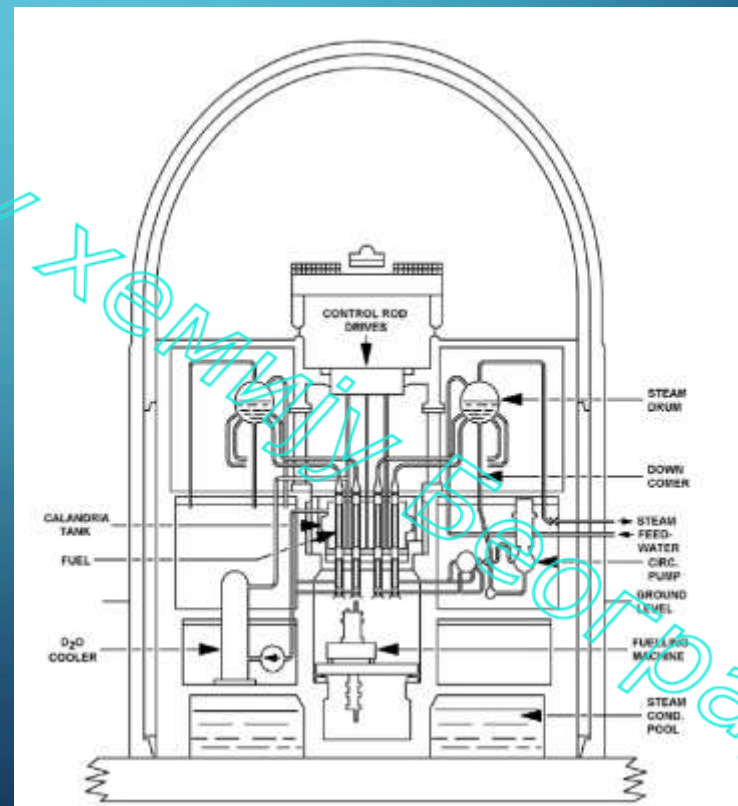


1. Слог горива
2. Каландрија (језгро реактора)
3. Контролне шипке
4. Резервоар са тешком водом под притиском
5. Генератор паре
6. Пумпа за обичну воду
7. Пумпа за тешку воду
8. Машина за пуњење
9. Тешка вода – модератор
10. Цев под притиском
11. Пара ка турбини
12. Хладна вода од турбине
13. Containment зграда од ојачаног бетона

BWR

- BWR, ATR, РБМК
- Негативне стране: поседује негативни „void“ коефицијент што повремено редукује снагу реактора.

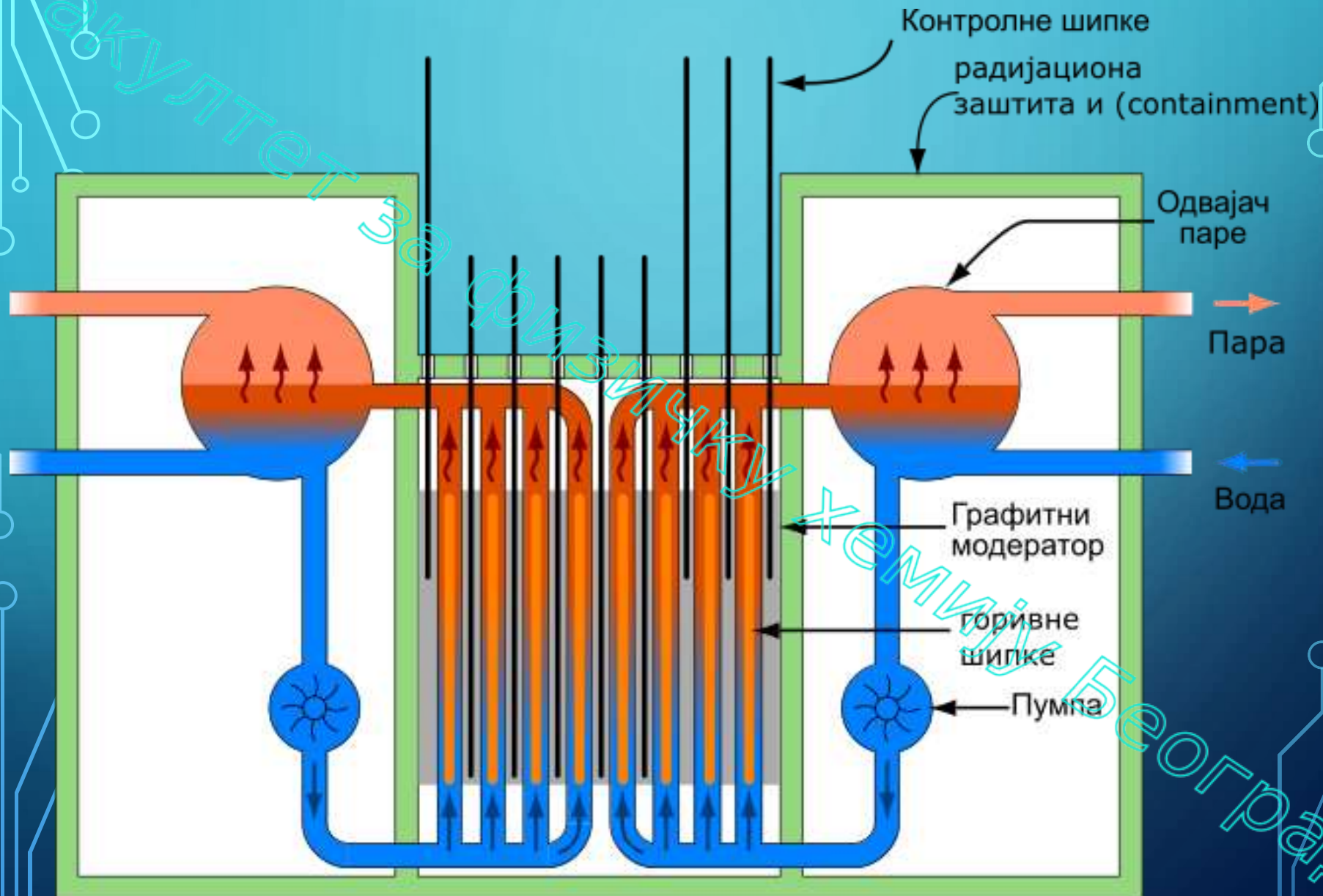
ATR (Advanced Thermal Reactor) – Јапански D_2O модерисани, водом хлађени реактор. Гориво мешовити оксиди UO_2 и PuO_2 . Поседује вертикалну каландрију



РБМК

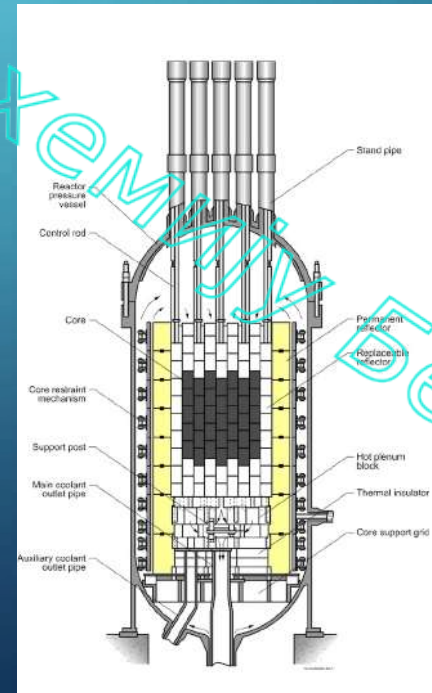
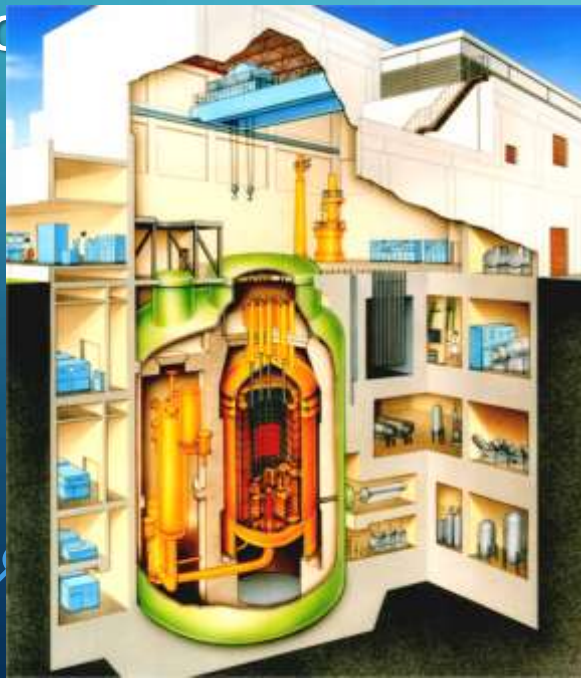
- Модератор графит, водено хлађење, слабо обогаћени уранијум
- Модуларни (канални) систем. Модул је цев од Zr–Nb легуре која садржи 2 слога горива.
- Око 1500 модула у стандардном РБМК–1000
- Модули се могу независно пунити/празнити/искључивати
- Сматрао се за један о сигурнијих типова реактора и првобитно није имао containment

РБМК

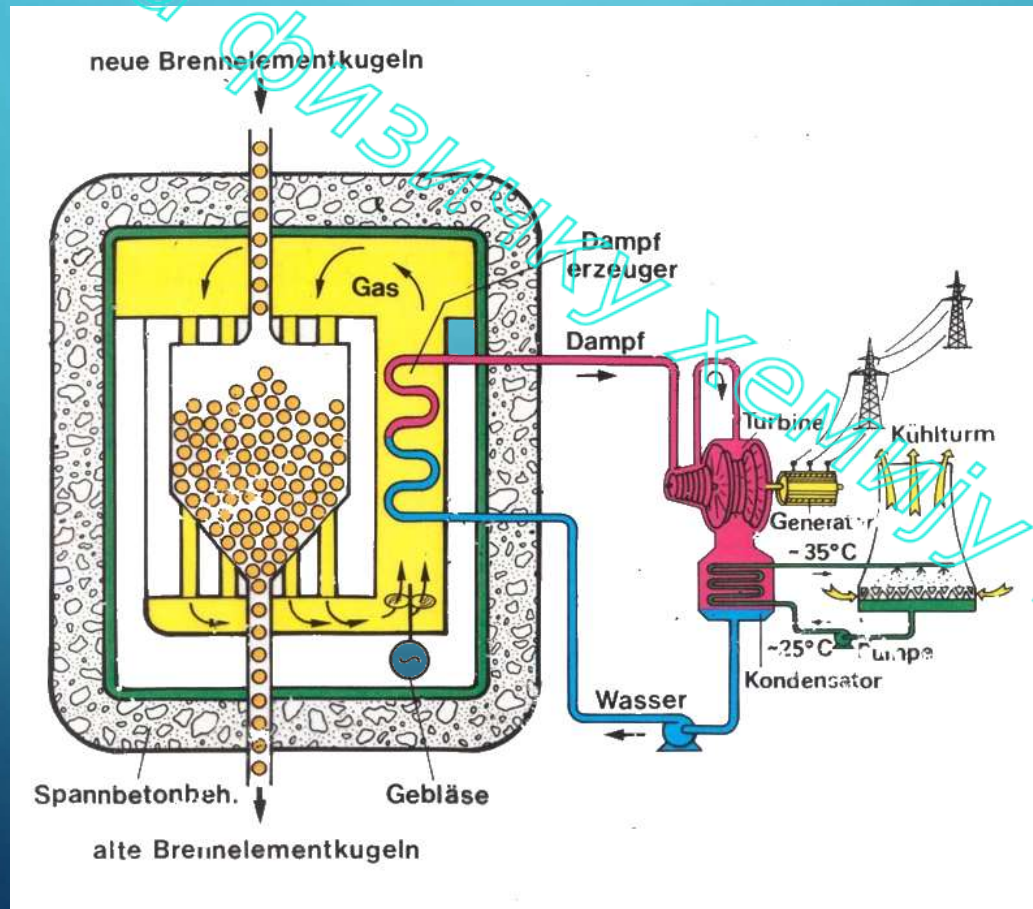


СПЕЦИЈАЛНИ РЕАКТОРИ

- HTGR реактор – експериментални, модератор графит, хлађење хелијум гас.
- Специјално гориво базирано на торијуму
- Температура хелијума достиже 950°C
- Наменен за производњу водоника у двостепеном процесу



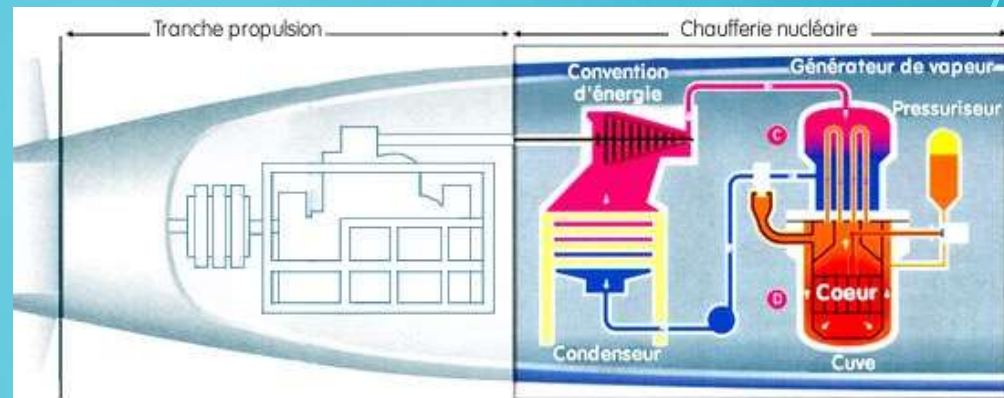
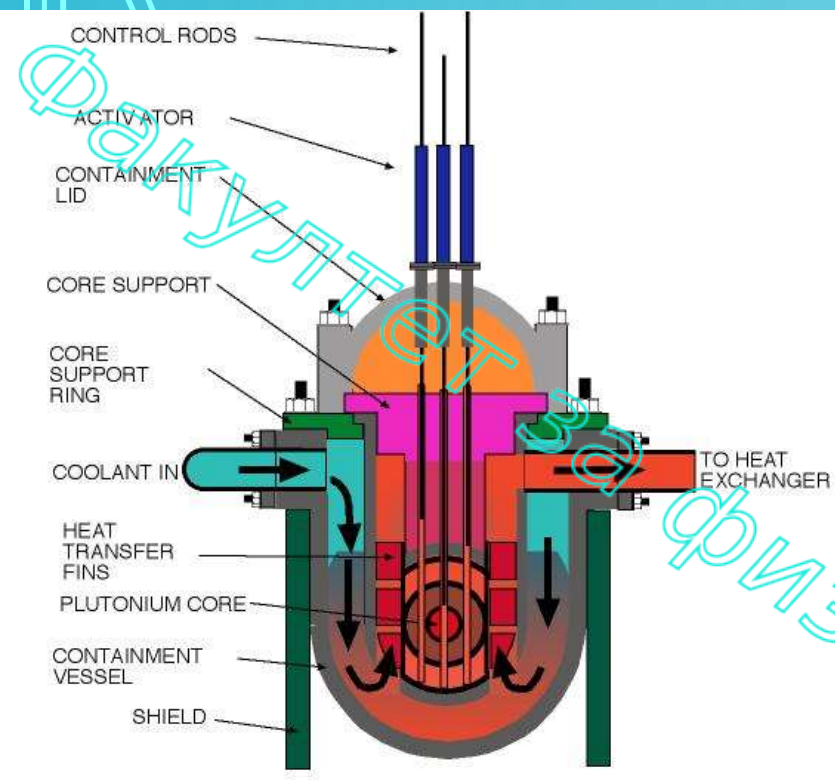
- ТНТР Немачки експериментални реактор, модератор графит, хлађен хелијумом
- Горивни елементи сфере ($r=6\text{ cm}$) од смеше $^{232}\text{U}/^{232}\text{Th}$ карбида распоређене у облику колоне



ПОГОНСКИ РЕАКТОРИ

- Користе се за покретање пловила и сателита
- Углавном су PWR (ВВЕР) типа и омогућавају кретање пловила без замене горива дужи временски период.
- Гориво високообогаћени уранијум (20–50% ^{235}U) или ^{239}Pu у легури са Zr. К се контролише додавањем фисионих отрова у гориво.
- Прво пловило на нуклеарни погон била је подморница USS Nautilus.
- Највеће пловило на нуклеарни погон је носач авиона USS Enterprise. Поседује 6 реактора PWR

типа



ОПЛОДНИ РЕАКТОРИ

- Подела
 - Са термалним неутронима
 - Са брзим неутронима
- Комбинација фисибилног/фертилног горива ($^{238}\text{UO}_2 + ^{239}\text{PuO}_2$, $^{233}\text{UO}_2 + ^{232}\text{ThO}_2$)
- Захтевају тврђи неутронски спектар (област енергија 600–700 eV)
- $\eta > 2$ услов за успешан рад обих реактора
 - ^{233}U термалне опплодни реактори
 - ^{239}Pu брзи опплодни реактори

ТЕРМАЛНИ ОПЛОДНИ РЕАКТОРИ

- Централна зона $^{233}\text{UO}_2$, $^{232}\text{ThO}_2$ у “blanket”–у
- Могуће је остварити конверзиони однос 1,06
- Експериментални реактор MSBR (Oak Ridge 1970)
 - $^{233}\text{UF}_4$, $^{232}\text{ThF}_4$ у растопу BeF_2 , ZrF_4 и LiF
 - Предности овог система у односу на хетерогени
 - Радијациони ефекти мањи него у чврстим системима
 - Једноставна припрема горива
 - Фисиони производи се могу континуирано извлачити (хемија проблем)
 - Гориво се може континуирано додавати
 - Велики негативни температурски коефицијент – лакша контрола

БРЗИ ОПЛОДНИ РЕАКТОР

- ^{239}Pu у језгру, ^{238}U у “blanket”-у, Fe као рефлектор
- $\eta=2,56$
- Постојање оваквих система омогућава да се искористе залихе осиромашеног и природног уранијума.
- Поред ^{239}Pu у “blanket”-у настаје и ^{241}Pu .
- Примери оплодних реактора
 - BN-350 (СССР/Казахстан) 1000 MW_{th} 1972–1994
 - Creys-Malville 1240 Mw_e хлађен течним натријумом (520°C) 1986–1997
- Предложени су реактори са течним оловом као хладиоцем

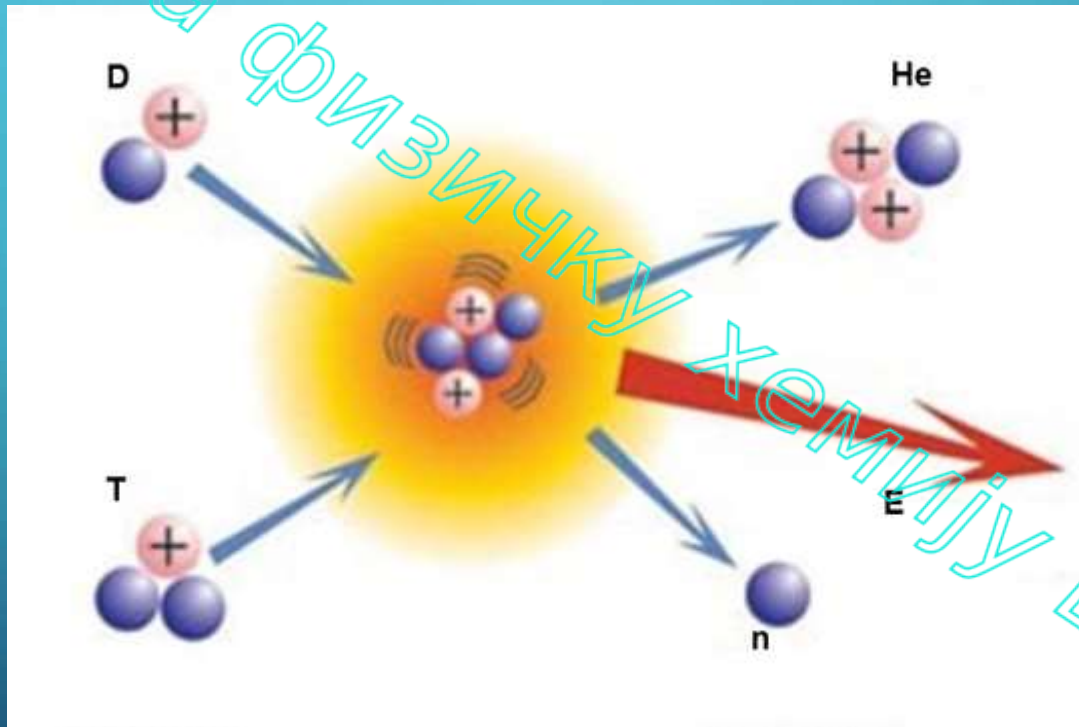
ХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ У РЕАКТОРУ

- Пролаз неутрона и гама зрачења кроз воду производи бројне реактивне (укључујући и кисеоник) врсте које при повишеној температури могу да доведу до корозије.
- Елементи ослобођени из зидова реактора депонују се на горивне елементе градећи тзв. Crud (Chalk River Unknown deposits) депозите који утичу на њихово хлађење
- Код PWR може се депоновати и бор (CIPS) што може индиковати превремену замену горивних елемената
- Проблеми са корозијом се решавају додавањем хидроксида у хладиоц и/или додавањем малих количина цинка („хемија цинка“)

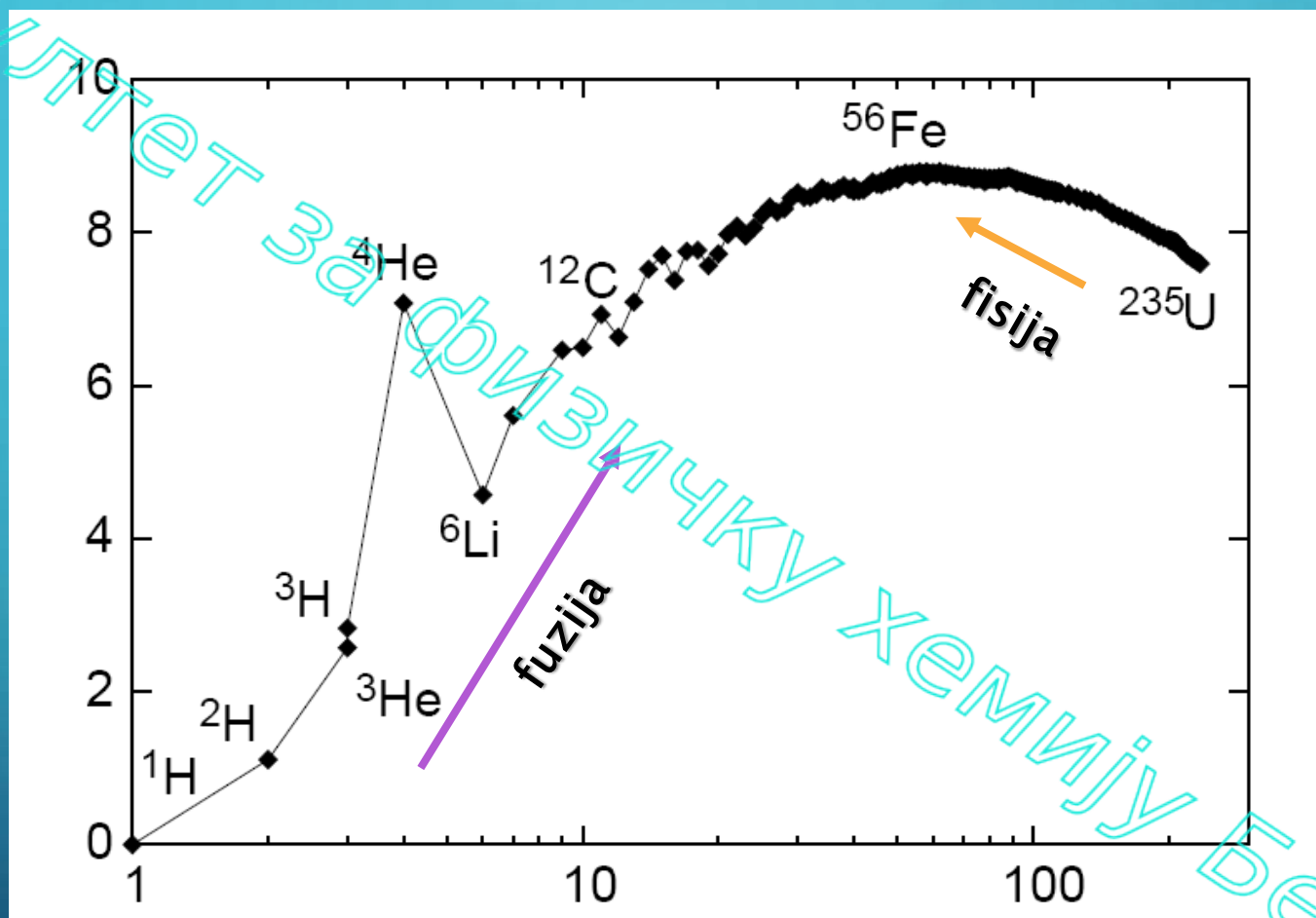
ФУЗИЈА



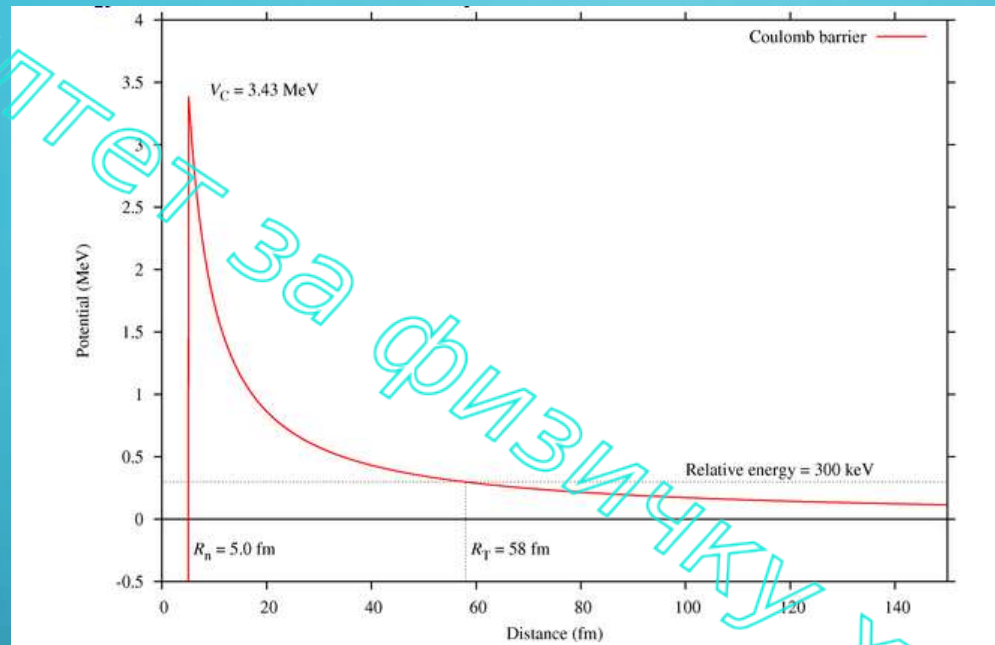
Фузијом се назива процес у којем долази до спајања два (не нужно) лака језгра при чему настаје тежи атом и ослобађа се велика количина енергије



ОТКУДА ОСЛОБОЂЕНА ЕНЕРИЈА У ФУЗИЈИ ?



КУЛОНОВА БАРИЈЕРА ЗА ПРОЦЕС ФУЗИЈЕ



$^{12}\text{C} + ^4\text{He}$ фузија

$$V_c = \frac{Z_X Z_Y e^2}{R_N} = \frac{Z_X Z_Y e^2}{r_0 (A_x^{1/3} + A_Y^{1/3})}$$

Стога реакција фузије има праг и

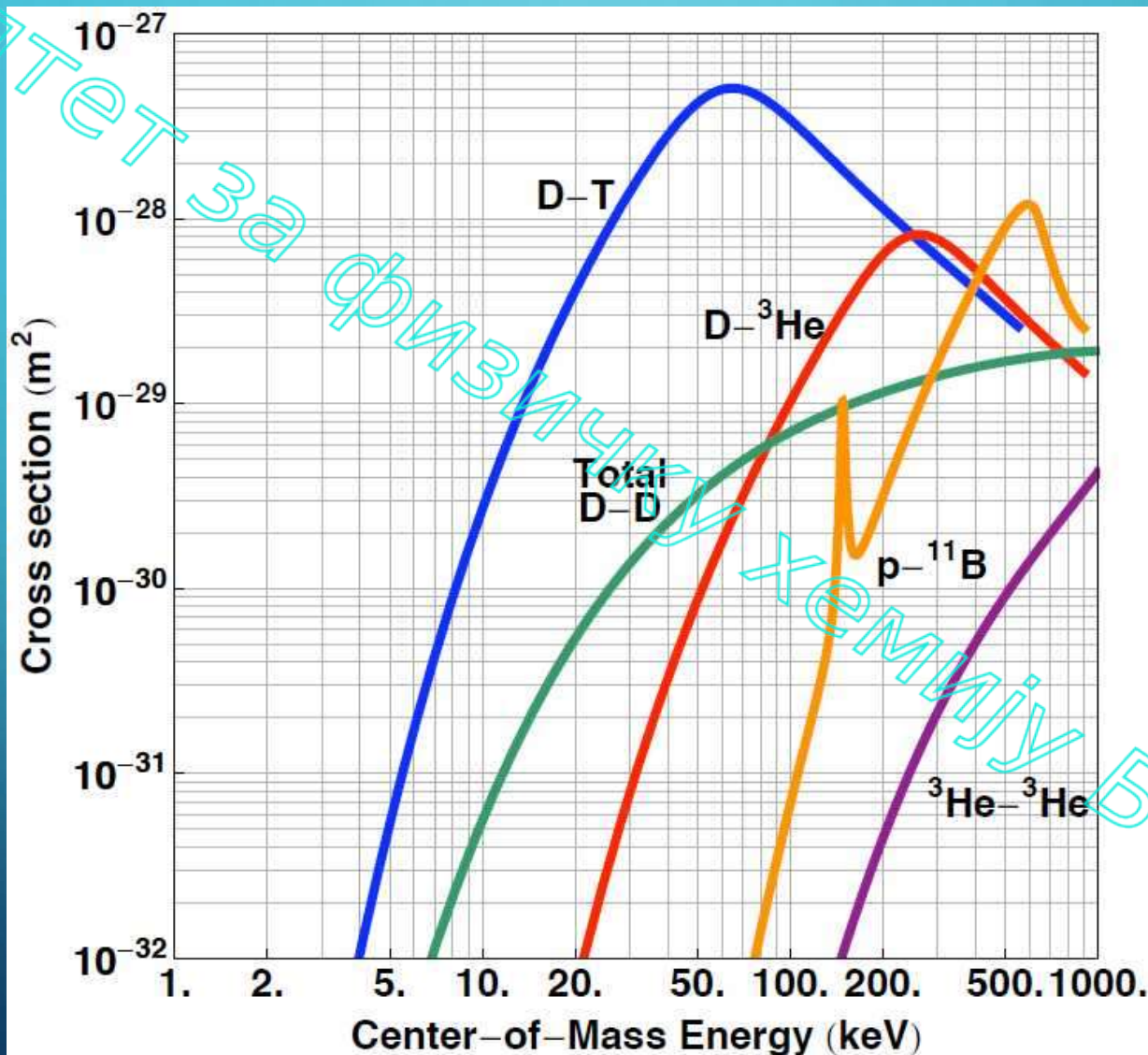
за њено одвијање реакције неопходно је довести довољно енергије реактантима: загревањем, акцелераторима...

НАЈВАЖНИЈЕ РЕАКЦИЈЕ ФУЗИЈЕ

бр	тип	Реакција	Q(MeV)
1	p-p	$H + H \rightarrow {}^2H + \beta^+ + \nu$	1,4
2	p-d	$H + D \rightarrow {}^3_2He + \gamma$	5,5
3	p-t	$H + T \rightarrow {}^4_2He$	19,8
4	d-d	$D + D \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n$ (50%)	3,27
		$D + D \rightarrow T + H$ (50%)	4,03
5	d-t	$D + T \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$	17,6
6	t-t	$T + T \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$	11,3
7		$D + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + {}^1_1p$	18,3
8		$D + {}^6_3Li \rightarrow 2 {}^4_2He$	22,4

- d-t реакција је најповољнија јер
 - Има најнижи температурни праг
 - Знатно већи ефикасни пресек за све температуре
 - Ослобађа 3,5 пута већу енергију по нуклеону од d-d реакције

ЕФИКАСНИ ПРЕСЕЦИ ЗА ФУЗИЈУ ЗА ВАЖНИЈЕ РЕАКЦИЈЕ

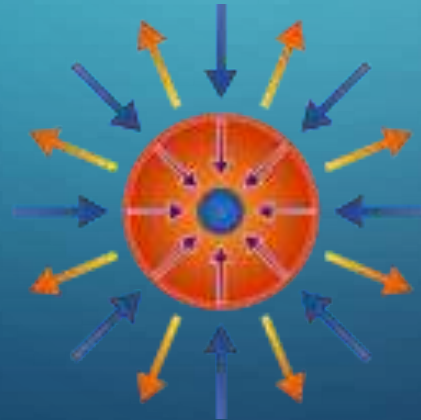
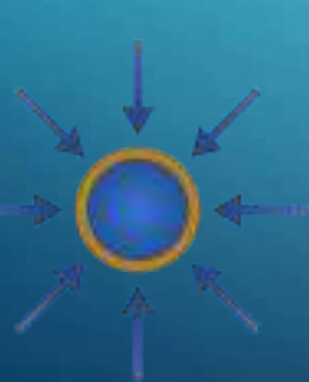


ФУЗИЈА У ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИМ УСЛОВИМА

- Токамак (**то**роидальна **ка**мера с **ма**гнитными **к**атушками) 1955. (Там и Сахаров 1950 теорија)



- Инерцијална конфинација



УСЛОВИ ДОСТИЗАЊА ПРАГА РЕАКЦИЈЕ

- Тритијум неопходан за реакцију добија се оплодњом у самом фузионом реактору



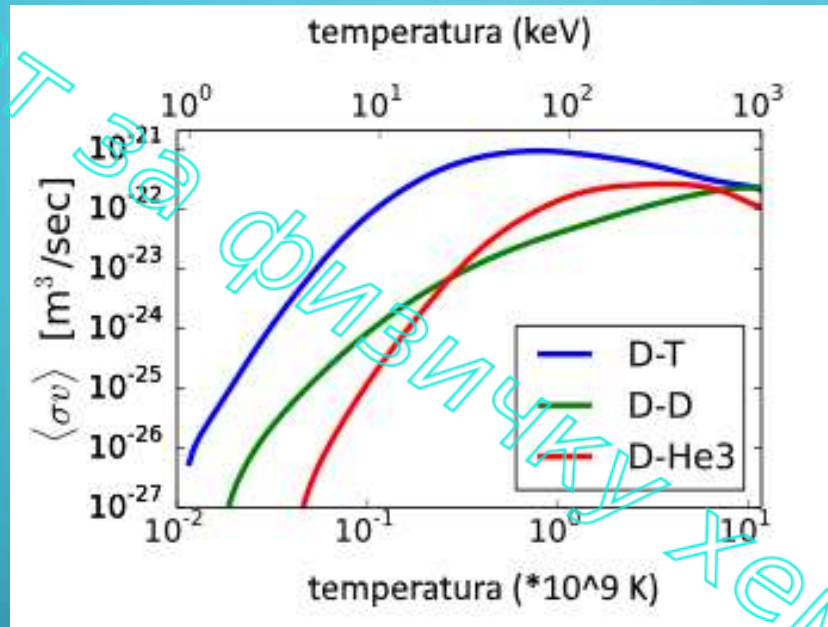
- Брзина D–T реакције пропорционална је производу концентрација реактаната, ефикасног пресека и брзине честица

$$k = n^2 \langle \sigma v \rangle$$

n – концентрација D и T $[D] = [T] = 10^{20} \text{ m}^{-3}$ – густина плазме

$\langle \sigma v \rangle$ – средња вредност производа ефикасног пресека и релативне брзине честица у судару

$$\langle \sigma v \rangle = 4\pi \left(\frac{\mu}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_0^{\infty} \sigma(v) v \cdot e^{-\left(\frac{\mu v^2}{2kT}\right)} dv$$



- Густина фузионе снаге ослобођена у јединичној запремини хомогене плазме је

$$W_f = n^2 \langle \sigma v \rangle Q_{D-T} \text{ Mev } m^{-3} s^{-1}$$

- Време конфинације

$$\tau_c = \frac{\text{укупна енергија плазме}}{\text{брзина губитка енергије плазме у околину}} \quad (s)$$

- Производ $\eta\tau_c$ назива се квалитет конфинације.
- Неопходан услов за фузију дат је Lawson–овим критеријумом

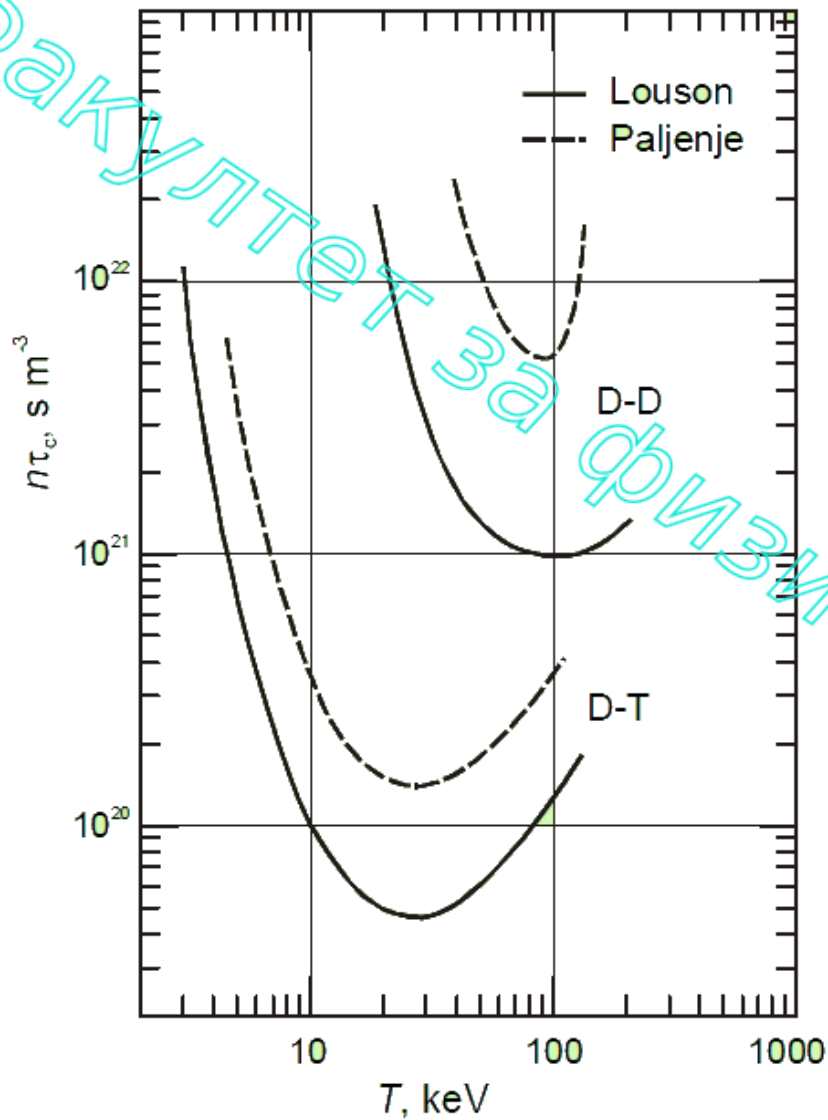
$$n\tau_c \geq \frac{3T}{\frac{\eta}{1-\eta} \frac{\langle\sigma v\rangle Q_{D-T}}{4} - \alpha T^{1/2}}$$

- $\eta = \eta_e \eta_g$ укупан коефицијент конверзије снаге
 - η_e коефицијент конверзије снаге у електричну
 - η_g коефицијент конверзије у грејање плазме
- α –параметар радијационих губитака услед заочног зрачења

- Лоусонов критеријум је изведен за случај кад се снага грејања континуално доводи у систем.
- Када се услов задовољи и $T > 5 \text{ keV}$ снага фузионих алфа честица енергије Q је довољна за одржавање плазме – т.ј. Тада **плазма гори**
- **Услов горења је**

$$n\tau_c \geq \frac{3T}{\frac{\langle \sigma v \rangle Q_\alpha}{4} - \alpha T^{1/2}} \approx \frac{12T}{\langle \sigma v \rangle Q_\alpha}$$

Када је задовољена једнакост испуњен је услов паљења плазме.



Лоусонов критеријум за D-T реакцију испуњен за $T=25$ keV и $n\tau_c = 7 \cdot 10^{19} sm^{-3}$

Услов паљења је испуњен за $T=30$ keV и $n\tau_c = 1,5 \cdot 10^{20} sm^{-3}$

Фузиони реактор

