

Termonuklearna fuzija

16

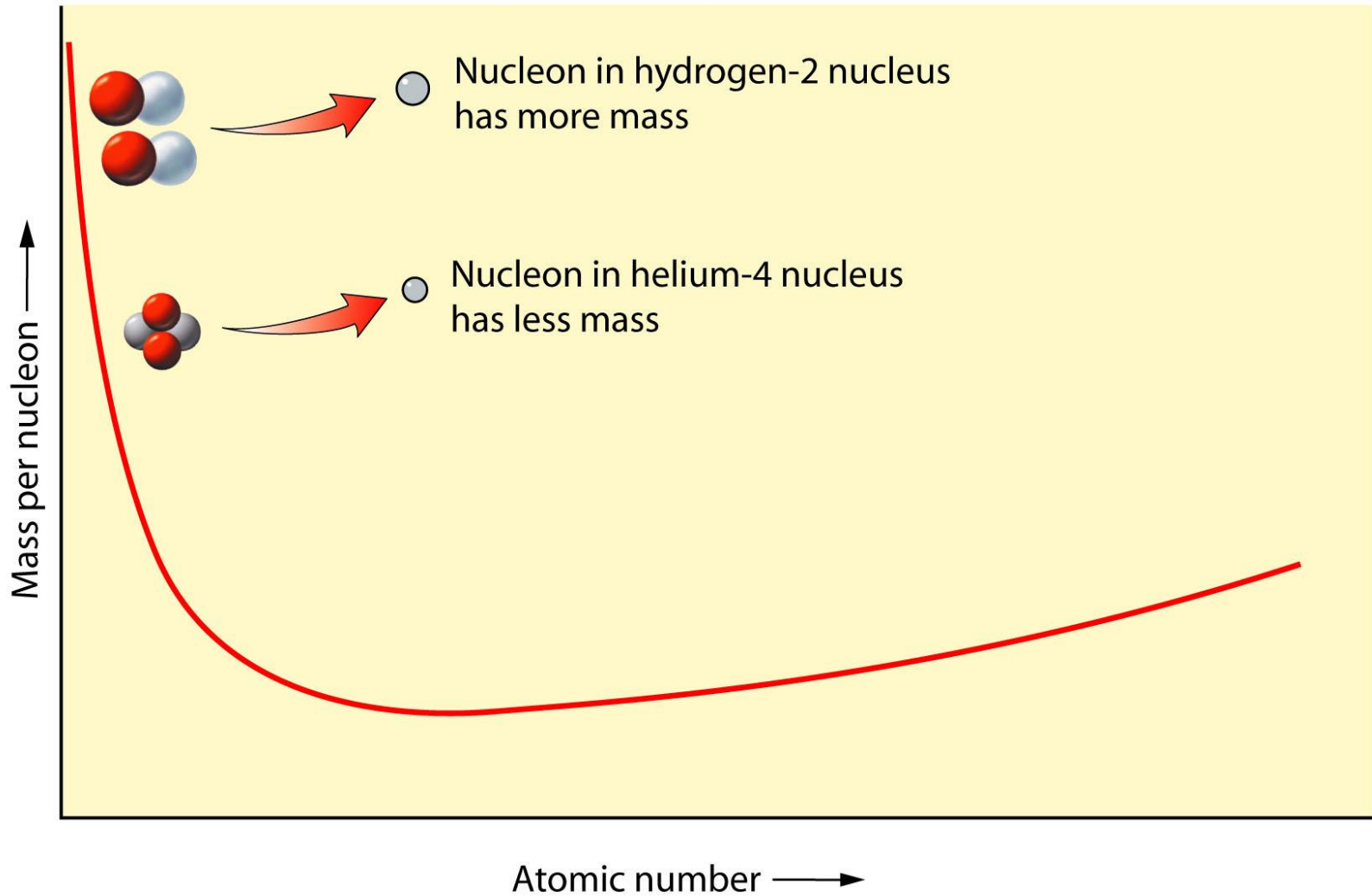
Uvodne napomene

- Razvoj fizike plazme je dobio snažan impuls oko 1950. godine u vezi sa pokušajima da se termonuklearne reakcije, slične onima koje se odigravaju u zvezdama, ostvarene na kontrolisan način u visokotemperaturnoj plazmi dobijenoj u laboratoriji.
- Malo istorije o fuziji:
 - 1934. god. Cockroft i Walton prvi put demonstrirali oslobađanje energije fuzije.
 - 1936. god. Rutherford prevideo nuklearnu reakciju fuzije između deuterijuma i tricijuma
 - 1950 – ih god. hidrogenska bomba.

Nekoliko činjenica iz nuklearne fizike

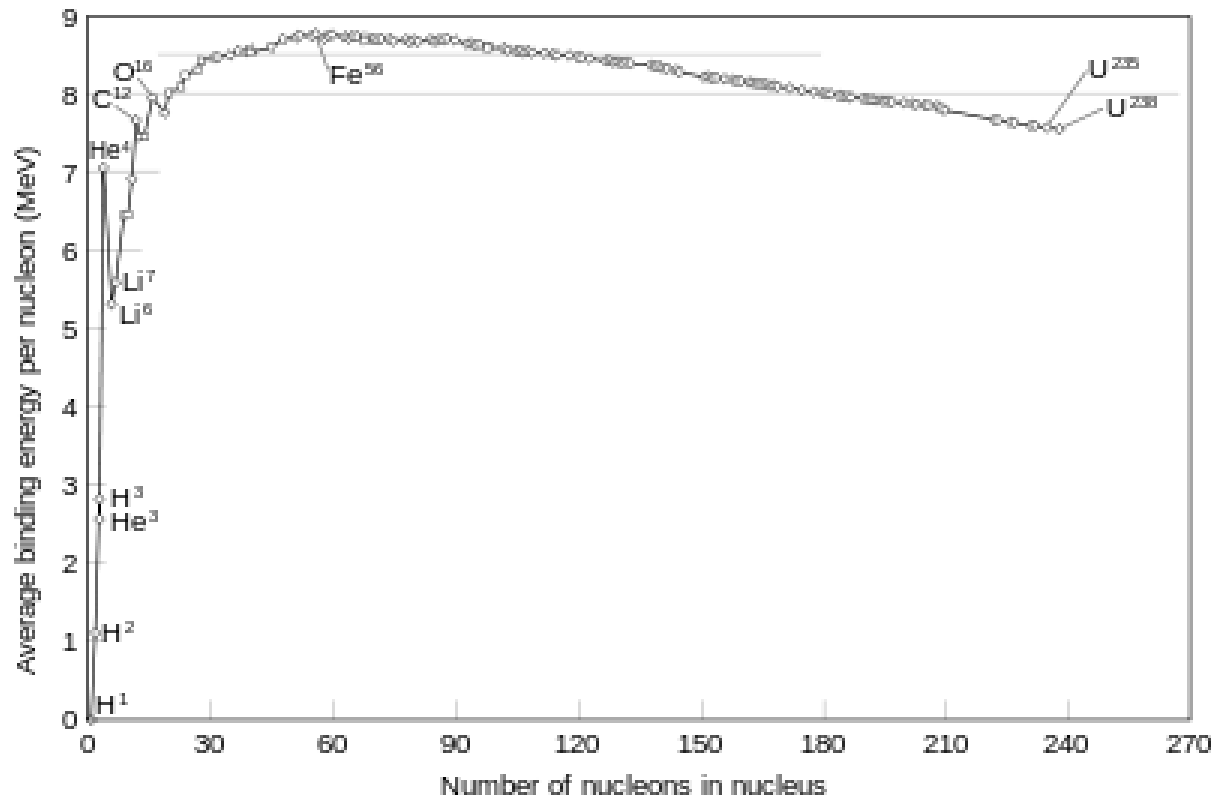
- Masa svakog atomskog jezgra uvijek je manja od zbira masa njegovih slobodnih nukleona (protona i neutrona) od kojih je sastavljeno.
- Defekt mase jezgra – razlika između ukupne mase svih slobodnih protona i neutrona koji ulaze u njegov sastav i stvarne mase jezgra, utvrđene metodama masene spektroskopije.
- S obzirom na Ajnštajn-ovu ekvivalentnost mase i energije ($E = mc^2$), proizlazi da se pri stvaranju neke atomske mase, jedan deo mase pretvorio u energiju, i to u energija veze (energija vezivanja).

Defekt mase po nukleonu



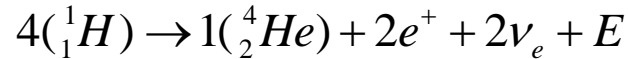
Energija vezivanja po jednom nukleonu

- Ako se vrednost nuklearne energije veze podeli s brojem nukleona u atomskom jezgru, dobija se nuklearna energija veze po nukleonu ili specifična nuklearna energija veze.



Energija veze

Kada se četiri protona udruže da formiraju jezgro ${}^4\text{He}$:

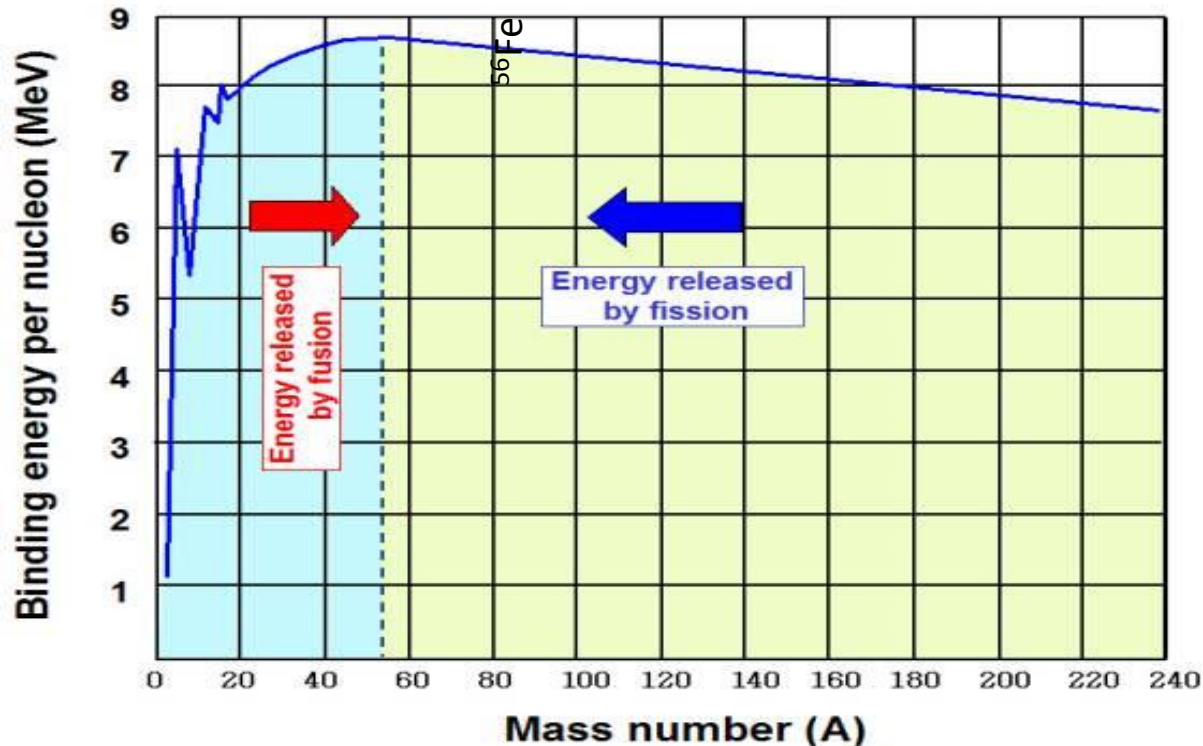


$$4(1.007277) \rightarrow 1(4.00150) + \Delta m$$

**nastaje defekt mase*

$$\Delta m = 0.02761\text{amu}$$

Defekt mase predstavlja ogromni iznos energije koji se računa po Ajnštajnovoj relaciji, $E=mc^2$, i obično se izražava u Mev-ima



Diskusija

- Nuklearna energija veze po nukleonu brzo raste u području lakih elemenata i sve do elemenata koje imaju atomsku masu oko 60, gde iznosi oko 9 MeV.
- Nakon toga dolazi do pada vrednosti, da bi za uran bila oko 7 MeV. Između atomskih masa 1 i 20 primjećuje se izlomljenost krive, s oštrim prelazima između najmanjih i najvećih vrednosti.
- Najmanje vrednosti u tom području imaju Li-6 i B-10, jer sadrže neparan broj protona i neutrona.
- Najveće vrednosti u tom području imaju He-4, C-12 i O-16, koji imaju paran broj nukleona. Možemo zaključiti da stabilnost atomskog jezgra zavisi o tome da li ima paran ili neparan broj nukleona.

nastavak

- Vidljivo je da među lakim atomskim jezgrama, atomsko jezgro He-4 (alfa-čestica) ima najveću nuklearnu energiju vezivanja po nukleonu, pa možemo zaključiti da alfa-čestice imaju vrlo stabilno atomsko jezgro.
- Osim toga, vidljivo je da najveću vrednost nuklearne energije vezivanja po nukleonu imaju atomska jezgra s atomskom masom od 40 do 100. Kod njih energija veze iznosi oko 8,7 MeV.
- Za atomska jezgra koja imaju atomsku masu veću od 100, nuklearna energija veze po nukleonu pomalo opada, tako da pri kraju U-238 ima vrijednost oko 7,5 MeV.

Šta zaključujemo na osnovu energije veze?

- Nuklearne reakcije u kojima bi se jezgro sa $A \geq 206$ raspalo na dva manja jezgra sa čvršće vezanim nukleonima (tzv. *nuklearna fisija*) morala biti praćena oslobađanjem energije.
- Isti zaključak mora važiti i za nuklearne reakcije u kojima bi se laka jezgra sa $A \leq 6$ spajala u teža (tzv. *nuklearna fuzija*) jer i u tom slučaju nukleoni prelaze iz stanja sa manjom u stanje sa većom energijom vezivanja.
- Tehnički problem: nalaženje tehničkog rešenja za odvijanje ovih reakcija u kontrolisanoj formi.
- Za fisione reakcije – nuklearni reaktor!
- Za fuzione reakcije analognog tehničkog rešenja još uvek nema!

Opšte o fuziji

- ✓ Kad se dva lakša jezgra spoje u teže jezgro oslobađa se energija.
- ✓ Problem je kako jezgrama dati dovoljno kinetičke energije da prevladaju odbojnu električnu silu.
- ✓ U unutrašnjosti Sunca temperatura je oko $1,5 \times 10^7 \text{ K}$, te je srednja kinetička energija na ovoj temperaturi dovoljna da nadvlada odbojnu nuklearnu silu - termonuklearna fuzionarna reakcija. Snaga Sunca je $4 \times 10^{26} \text{ W}$.

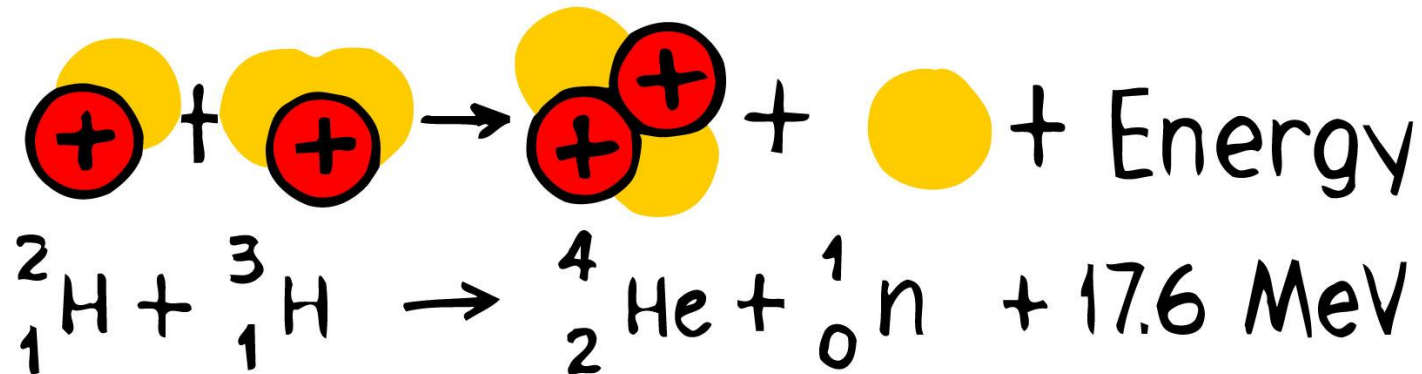
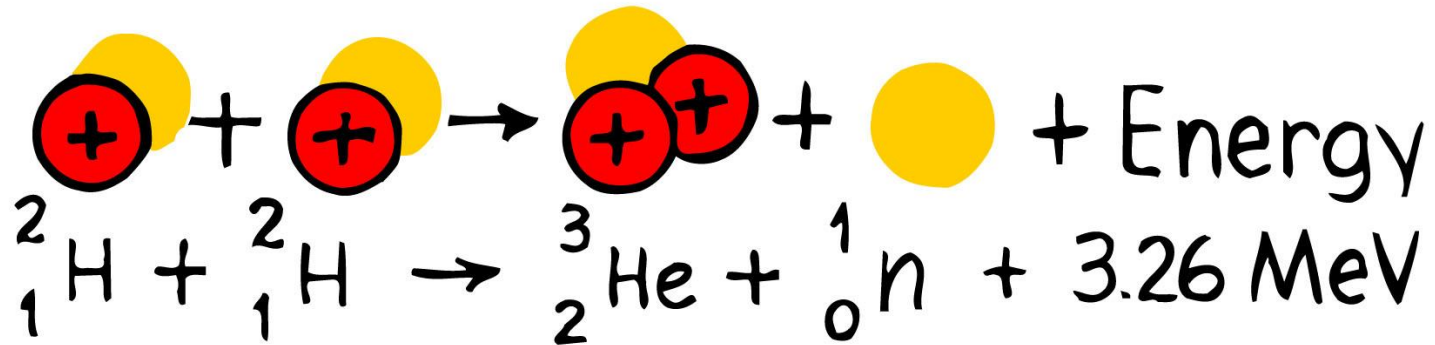
Uslovi za fuziju

- Praktični problemi:
 - vrlo visoke temperature > 100 miliona K
 - svi materijali prelaze u stanje plazme
 - puno energije za zagrevanje goriva
 - zbog neutrona materijal reaktora postaje radioaktivan

Reakcije fuzije

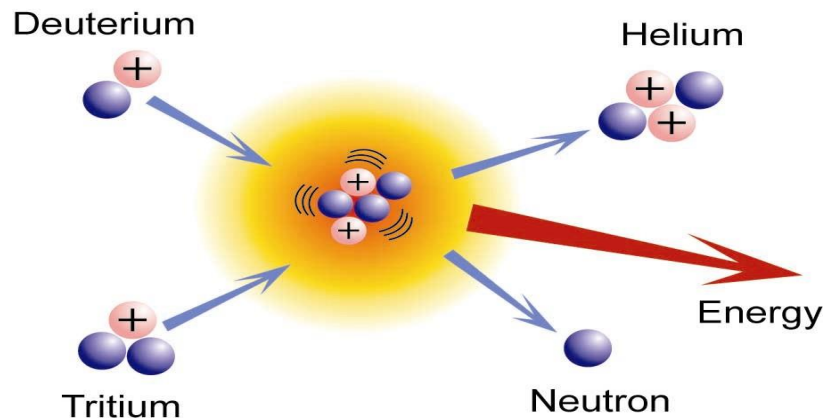
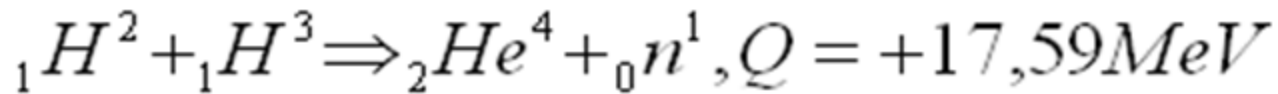
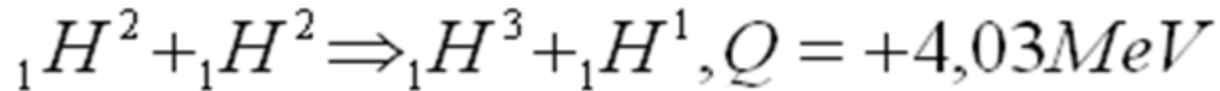
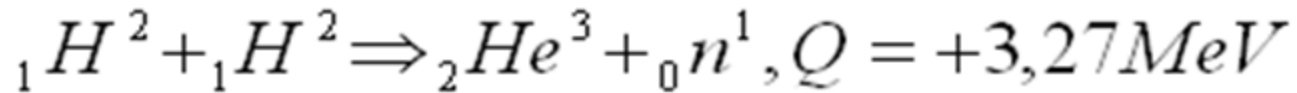
- ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \Rightarrow {}_1\text{H}^3 + {}_0\text{n}^1 + 3,27\text{MeV}$
- ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \Rightarrow {}_1\text{H}^3 + {}_1\text{H}^1 + 4,03\text{MeV}$
- ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^2 \Rightarrow {}_1\text{H}^3 + 5,5\text{MeV}$
- Deuterijum, koji je osnovna sirovina za većinu nuklearnih reakcija fuzije, ima neograničen sirovinski potencijal jer ga ima u izobilju, jedna molekula deuterijuma na 6500 molekula obične vode.

Nuklearne reakcije fuzije



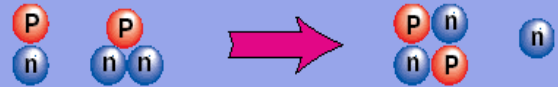

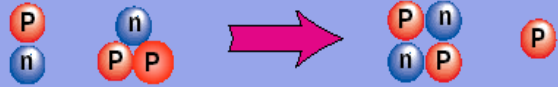

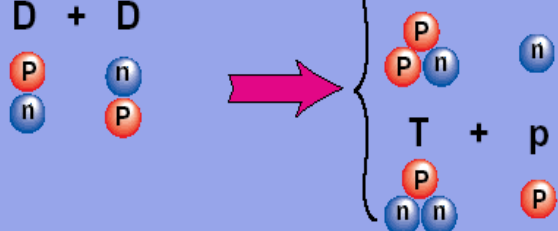


Fuzione reakcije

Na Zemlji, u laboratorijskim uslovima, su ostvarive fuzione reakcije tipa:



D-T fuziona
reakcija

Uslovi za fuziju

Reaction		Ignition Temperature		Output Energy
Fuel	Product	(millions of °C)	(keV)	(keV)
$D + T$ 	$4\text{He} + n$	45	4	 17,600
$D + {}^3\text{He}$ 	$4\text{He} + p$	350	30	 18,300
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$	400	35	 ~4,000
	$T + p$	400	35	 ~4,000

Reakcije od interesa za ostvarivanje kontrolirane fuzije zajedno s potrebnom početnom temperaturom i iznosom dobijene energije

Zaključak – 6 mogućih fuzionih reakcija

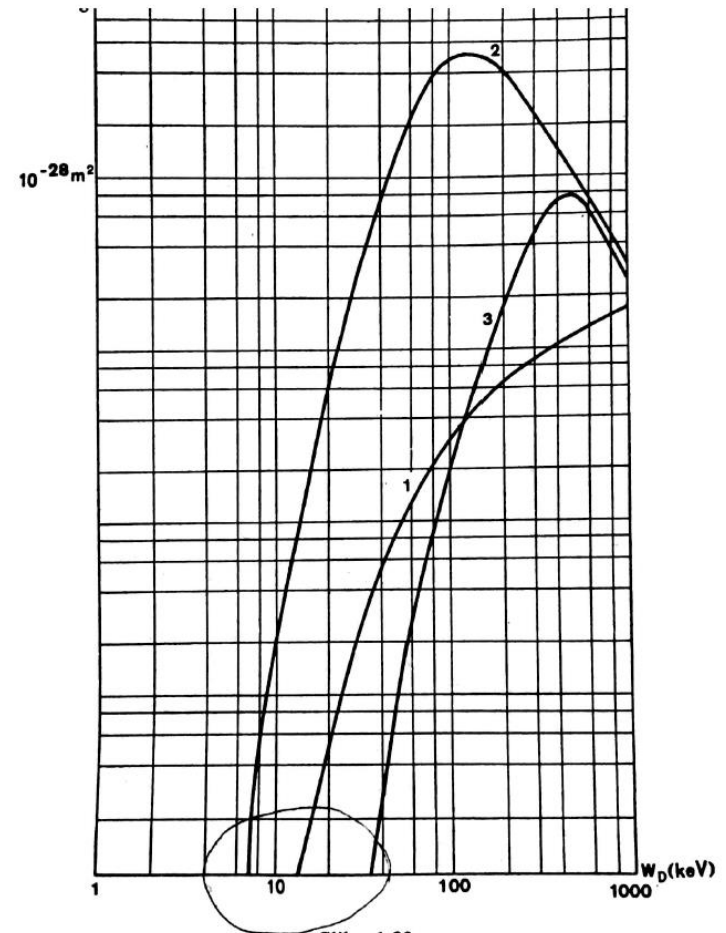
- $D(d,n)He^3$ (3.25 MeV)
- $D(d,p)T$ (4.0 MeV)
- $T(d,n)He^4$ (17.6 MeV)
- $He^3(d,p)He^4$ (18.3 MeV)
- $Li^6(d,\alpha)He^4$ (22.4 MeV)
- $Li^7(p,\alpha)He^4$ (17.3 MeV)
- Prve dve reakcije su tehnički najinteresantnije, zbog postojanja znatnih količina deuterijuma na Zemlji u obliku teške vode i razrađenih tehnoloških postupaka za njegovo dobijanje.
- Obe reakcije približno jednaku verovatnoću, zbog čega se zajednički označavaju kao D-D reakcija.

Dve napomene

- Kada bi se sav deuterijum iz jednog litra teške vode iskoristio u kontrolisanoj fuzionoj reakciji, dobila bi se energija jednaka onoj koju dobijamo od oko 1.5 milion litara benzina. Drugim rečima, jedan litar obične vode (u kome ima oko 0.2 mililitra teške vode) bilo bi ekvivalentno sa oko 300 litara benzina.
- 1 *barn* = 10^{-28} m². Radijus atomskog jezgra je reda veličine 10^{-14} m, tako da 1 *barn* približno predstavlja površinu poprečnog preseka jezgra, zamišljenog u obliku krute sfere

Efikasni presek

- Iz nacrtanih krivih se vidi da je kod ovih reakcija kulonovska barijera znatna jer prag reakcije leži u oblasti oko 10 keV.
- Maksimalni preseki su reda veličine jednog barna i dostižu se pri energijama reda veličine nekoliko stotina keV.
- Iz svega ovoga svega kao praktičan zaključak sledi da deuteronu treba dovesti energiju reda veličine 1 MeV da bi, sa nezanemarljivom verovatnoćom, bio u stanju da savlada elektrostatičko odbijanje drugog deuterona i stupi sa njim u fuzionu reakciju.



Slika 1.20.
Zavisnost efikasnog preseka D-D reakcija (1), D-T reakcije (2) i D-He³ reakcije (3) od energije upadnog deuterona

Primer – fuzija (Coulombova barijera)

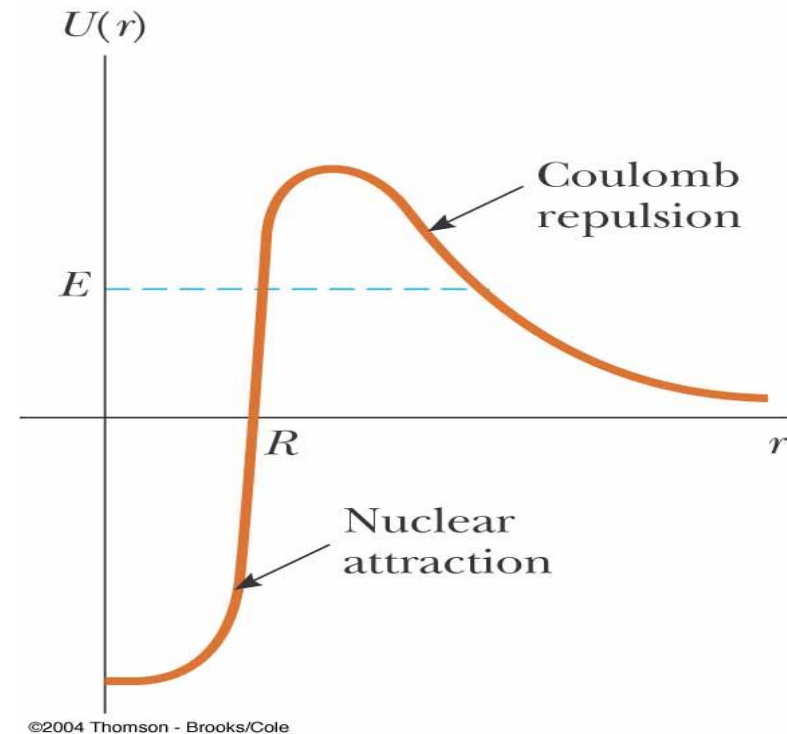
• Pretpostavimo da je proton sfera radijusa $R=1$ fm. Dva protona iste kinetičke energije lete jedan prema drugom.

a.) Kolika mora biti kinetička energija protona da bi nadvladala odbojnu Columbovu silu baš kad se protoni dodiruju.

$$2E_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2R} \quad E_k = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{16\pi(8,85 \cdot 10^{12} \text{ F/m})(1 \cdot 10^{-15} \text{ m})}$$
$$= 5,75 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 360 \text{ keV} \approx 400 \text{ keV}$$

b.) Kolika bi trebala biti temperatura gasa vodonika da bi srednja kinetička energija protona bila dovoljna da nadvlada Coulombovu barijeru kako bi došlo do fuzije.

$$E_k = \frac{3}{2} kT \rightarrow T = \frac{2E_k}{3k} = \frac{2(5,75 \cdot 10^{-14} \text{ J})}{3(1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})} = 3 \cdot 10^9 \text{ K}$$



- Temperatura na Suncu je $1,5 \times 10^7$ K, tako da samo jedan od 10^{26} sudara protona rezultira fuzijom ($p+p \rightarrow d+e^++\nu$) $Q=0.42$ MeV

Zašto plazma?

- Jedini način da se nuklearna fuzija u D-D reakciji isplati je, kako se danas veruje, da se temperatura deuterijuma podigne na nekoliko desetina miliona stepeni, pošto bi tada energija termalnog kretanja deuterona bila dovoljna za savladavanje kulonovske barijere i odvijanje fuzione reakcije.
- Preciznije rečeno, na temperaturi od nekoliko desetine miliona stepeni će ove čestice imati srednju energiju termalnog kretanja reda veličine nekoliko keV, tako da će kulonovsku barijeru moći savladati samo malobrojni deuteroni iz visokoenergetskog repa Maksvel-ove raspodele.
- Na tako visokoj temperaturi, međutim, *deuterijum se sigurno nalazi u stanju plazme*, čime se objašnjava porast interesovanja za ovo agregatno stanje.

Problemi:

- Problem je zagrevanja plazme do termonuklearnih temperatura, mada ne i najteži.
- Najveće teškoće zadaje problem održavanja (konfiniranja) plazme, pošto nikakvi materijalni zidovi ne bi bili u stanju da izdrže termonuklearne temperature.
- Rešenje: plazma je sastavljena od jonizovanih čestica na čije kretanje se može uticati magnetnim poljem. Magnetno polje Lorenc-ovom silom prisiljava naelektrisanu česticu da se kreće po trajektoriji koja obavlja njegove linije sila.
- Ali... prave konfiguracije magnetnog polja nisu još uvek nađene, i naelektrisane čestice vrlo brzo pobegnu iz svakog magnetnog polja sa kojim se pokušalo.

Ukratko o konfiniranju plazme

- Mnoge geometrije magnetnog polja su do sada ispitane, ali još nisu nađene takve u kojima bi visokotemperaturna plazma ostala trajno konfinirana.
- Visokotemperaturna plazma u lab uslovima je jedna esencijalno nestabilan sistem, pošto je njeno stanje daleko od stanja termodinamičke ravnoteže sa okolinom.
- Prema tome, ako se na neki način i suzbije jedan tip nestabilnosti, u plazmi počinje odmah da se javlja neki drugi tip nestabilnosti.
- Naime, razvijanje nestabilnosti predstavlja mehanizam čijim posredstvom plazma nastoji da se približi stanju termodinamičke ravnoteže sa okolinom.

nastavak

- Imajući sve ovo u vidu, naponi na konfiniranju plazme se i ne usmeravaju na apsolutnu (trajnu) stabilizaciju svih nestabilnosti, već se samo traže uslovi pod kojima bi bile suzbijene one brze (opasne) nestabilnosti koje razaraju tek formiranu visokotemperaturnu plazmu već za nekoliko desetina mikrosekundi ili još manje vreme.
- Pažljivim odabirom karakteristika magnetnih polja i plazmenih uređaja danas su postignuta tipična vremena održavana (konfiniranja) od $\sim 500 \mu\text{s}$.
- Međutim, za termonuklearne svrhe bi bilo potrebno znatno veće vreme konfiniranja, nemnaje od 1 s.

Lovson-ov (Lawson) kriterijum

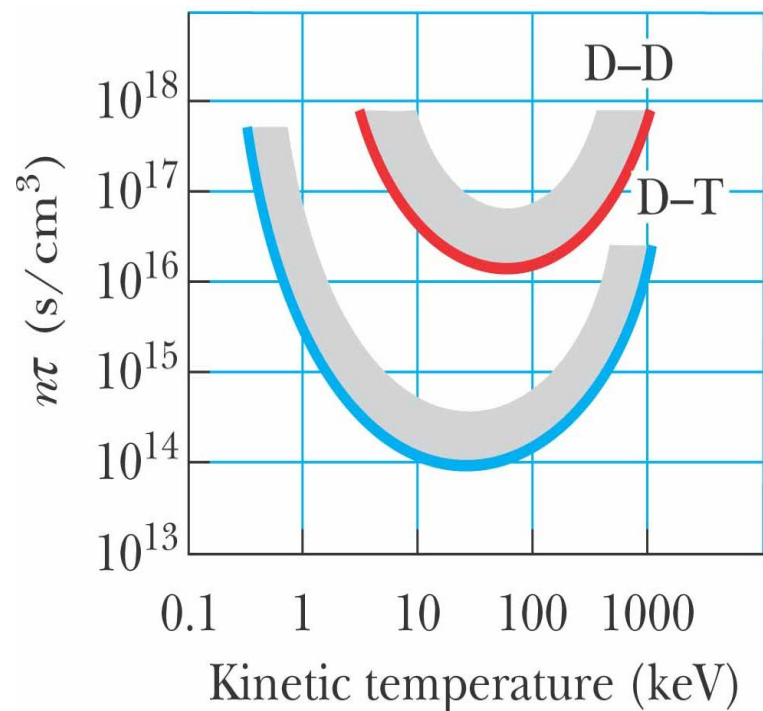
- Lovson-ov kriterijum je uslov koji mora da zadovoljava koncentracija jona plazme n i vreme konfiniranja τ :

$$n \tau \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$$

da bi termonuklearna (TN) reakcija imala pozitivan energetski bilans.

Lawsonov kriterijum

- J. D. Lawson je pokazao da gustina jona (n) i vremenski interval unutar kojeg je plazma na temperaturi koja osigurava fuziju τ (*confinement time*) moraju biti dovoljno veliki da osiguraju više energije proizvedene fuzijom nego što se utroši na zagrijavanje plazme.
- Lawson's kriterij glasi: *neto izlazna snaga u fuzijonom reaktoru je moguća ako su ispunjeni sljedeći uslovi:*
 - $n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3$ za deuterijum-tricijum (D-T)
 - $n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3$ za deuterijum-deuterijum (D-D)
 - Ovo su minimumi u krivama koja prikazuje Lawsonov $n\tau$ broj u zavisnosti od temperature za D-T i D-D fuzijonu reakciju.



Fizički uslovi za fuzioni reaktor

- Iako za sada nije poznato kako će tačno izgledati reaktor za fuzionu nuklearnu reakciju, pouzdano se zna da postoje određeni fizički uslovi koji moraju biti zadovoljeni pri njegovom radu.
- Poluempirijske formule za preseke D-D i D-T reakcije u funkciji energije upadnog deuterona W_D :

$$\sigma_{DD} = \frac{2.88 \cdot 10^{-26}}{W_D} \exp(-45.8 W_D^{-1/2})$$

$$\sigma_{DT} = \frac{2.19 \cdot 10^{-24}}{W_D} \exp(44.24 W_D^{-1/2})$$

- U ovim formulama W_D treba uzeti u keV, a preseki se dobijaju u m^2 .

Poluempirijske formule za preseke D-D i D-T reakcije u funkciji od temperature

- Ako se pretpostavi da je raspodela čestica plazme po brzinama data Maksvel-ovom funkcijom

$$f_{\alpha}(\mathbf{v}) = n_{\alpha} \left(\frac{m_{\alpha}}{1\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_{\alpha} v^2}{2kT} \right)$$

tada je

$$\overline{(\sigma v)}_{DD} = \frac{2.33 \cdot 10^{-20}}{T^{2/3}} \exp(-18.76T^{-1/3})$$

$$\overline{(\sigma v)}_{DT} = \frac{3.68 \cdot 10^{-18}}{T^{2/3}} \exp(-19.94T^{-1/3})$$

gde je temperatura T izražena u keV.

Gustina snage oslobođene u TN reaktoru

- Gustina snage (energija oslobođena u jedinici vremena po jedinici zapremine reaktora) se očividno ponaša po formulama

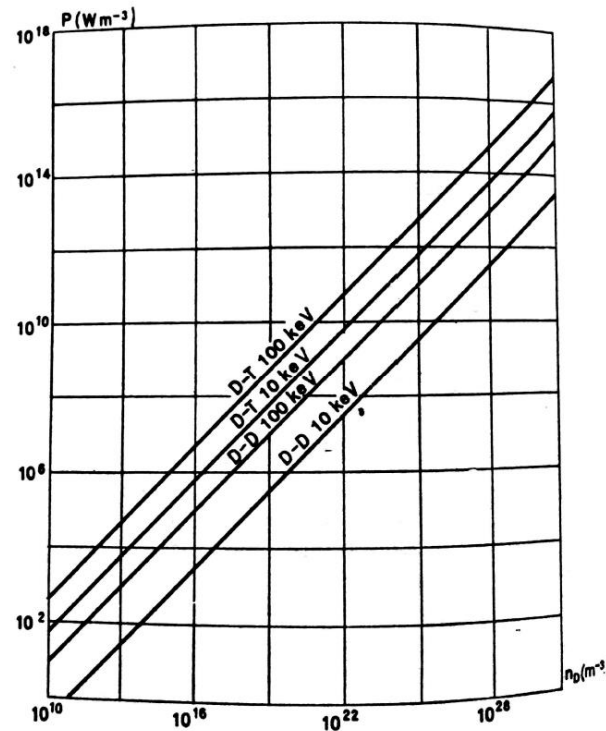
$$P_{DD} = \frac{1}{2} n_D^2 \overline{(\sigma v)}_{DD} Q_{DD}$$

$$P_{DT} = n_D n_T \overline{(\sigma v)}_{DT} Q_{DT}$$

- Q_{DD} i Q_{DT} označavaju energiju (u Džulima) oslobođenu u jednom aktu fuzije u korespondentnim reakcijama.

U fuzionom reaktoru

- Ilustracija zavisnosti gustine oslobođene energije u fuzionom reaktoru u funkciji koncentracije deuterona pri različitim temperaturama



Temperatura paljenja

- Postoji izvesna minimalna temperatura plazme, ispod koje termonuklearna reakcija sigurno ne može imati pozitivan energetski bilans.
- Pri određivanju ove tzv. temperature paljenja, polazi se od činjenice da plazma gubi deo svoje energije na zračenje, prvenstveno zakočno zračenje.
- Uslov pozitivnog bilansa se izražava nejednačinom

$$P \geq J^{(z)}$$

gde je integralna emisivnost plazme

$$J^{(z)} = Az_i^2 n_i n_e \sqrt{T_e}$$

- Tako se, numeričkim rešavanjem nejednačine $P_{DD} \geq J^{(z)}$ dobija temperatura paljenja od oko 35 keV, za reaktor u kome bi se odigravala D-D reakcija.

Zaključak

- Temperature ~ 100 keV (preko sto miliona stepeni!) su optimalne za plazmu u kojoj bi se odigravala energetski rentabilna termonuklearna reakcija.
- Ovakva reakcija zahteva i zadovoljavanje Lovson-ovog kriterijuma za koncentraciju plazme i vreme njenog života (održavanja). Dakle, za D-D termonulearnu reakciju

$$T \geq 100 \text{ keV}, n\tau \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$$

- Napori za realizovanje ovakve reakcije se danas kreću duž dve osnovne linije istraživanja:
 - istraživanje plazme male gustine u nekom uređaju za magnetno konfiniranje.
 - ispitivanje vrlo gustih plazmi formiranih trenutnim isparavanjem čvrstih meta pod uticajem laserskog zračenja.