

Detekcija tricijuma na zidovima fuzionih reaktora

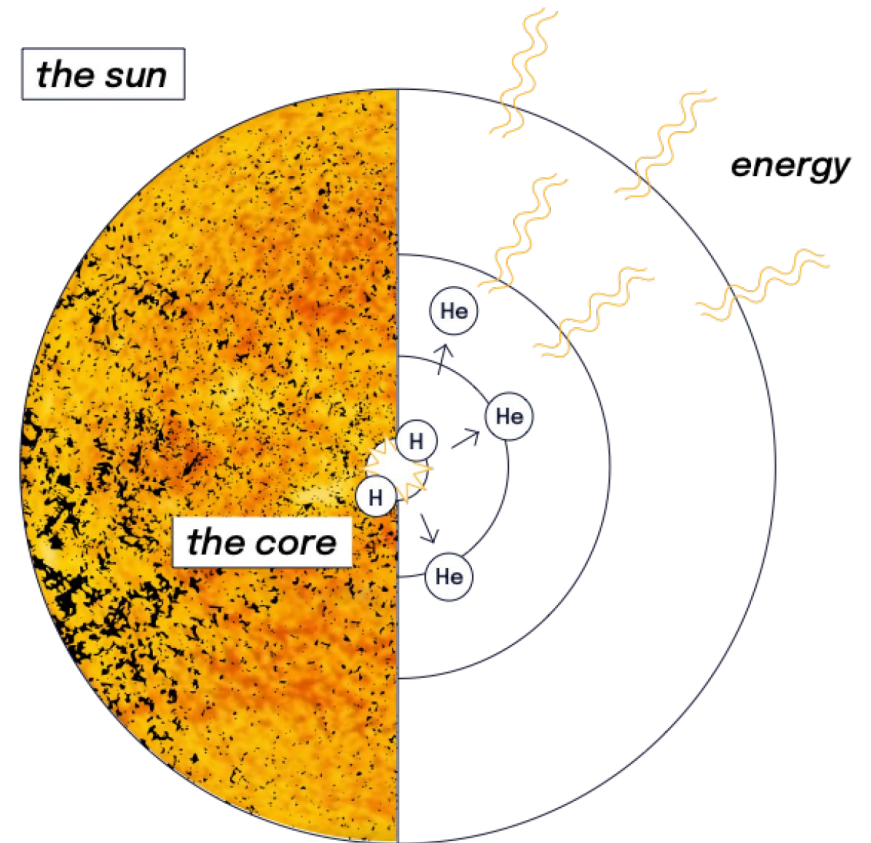
Nikola Vujadinović

- student doktorskih studija na PMF-u u Novom Sadu
- istraživač pripravnik na Institutu za fiziku u Zemunu

Mentori: dr Lazar Gavanski i dr Ivan Traparić

Sunčeva plazma

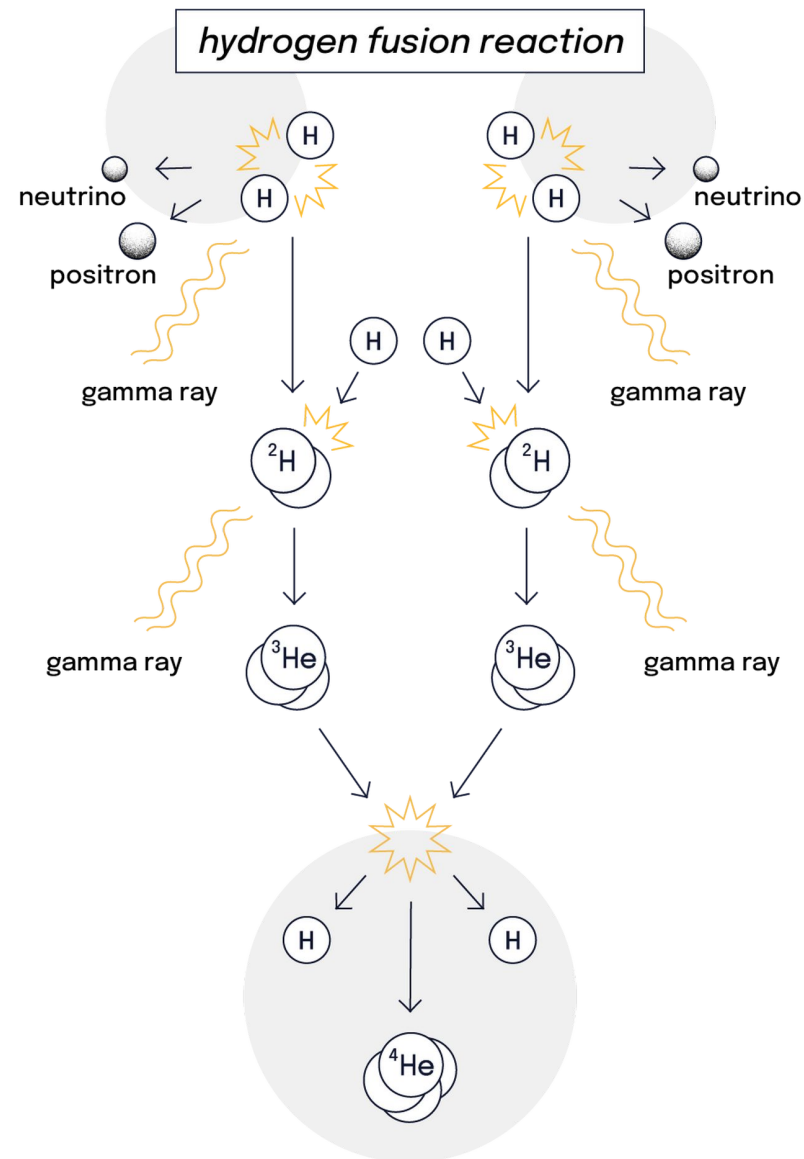
- Sunčev sistem je stvoren raspadom međuzvezdanog oblaka pod uticajem sopstvene gravitacije.
- Veći deo materije se grupisao u centru (Sunce), dok je ostatak formirao rotirajući disk (buduće planete).
- Centralna masa postajala je toliko gusta i topla da je prešla u stanje plazme.
- Plazma – visoko jonizovano stanje u kojem se nalaze elektroni, pozitivno naelektrisani joni i neutralne čestice i zahteva sredinu velike temperature i pritiska.
- U jezgru Sunca temperature dostižu 15 miliona °C!



Fuzija u Suncu

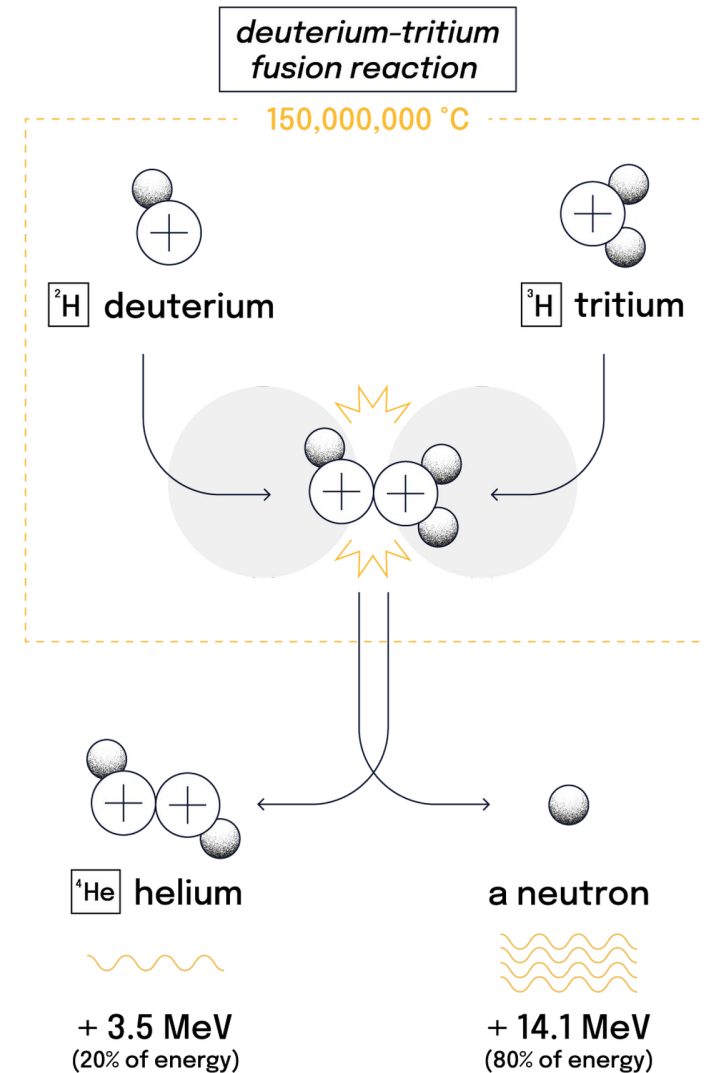
- Atomi vodonika se sudaraju pri veoma velikim brzinama, elektrostatičko odbijanje između njihovih jezgara biva savladano i atomi se spajaju – **nastaje helijum**.
- Šta vidimo kao svetlost i osetimo kao toplotu Sunca je upravo rezultat fuzionih reakcija u njegovom jezgri – bez fuzije nema života na Zemlji!
- **Kako se fuzijom dobija energija?**
- Masa nastalog jezgra helijuma nije tačan zbir masa početnih atoma vodonika. Deo mase je izgubljen, a zbog ekvivalentnosti mase i energije, dolazi do oslobodanja energije:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$



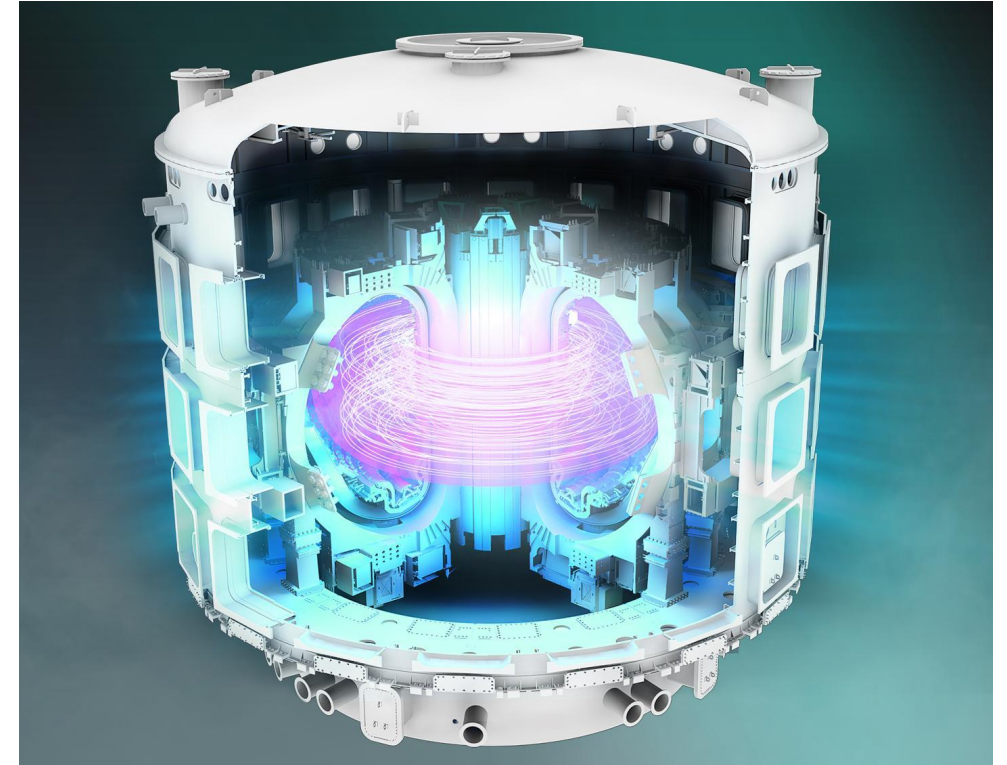
Fuzija na Zemlji

- Bez pomoći tako jakih gravitacionih sila kakve vladaju u jezgri Sunca, postizanje fuzije na Zemlji zahteva drugačiji pristup.
- Kao najefikasnija reakcija fuzije u laboratorijskim uslovima identifikovana je reakciju između dva izotopa vodonika: **deuterijuma (D)** i **tricijuma (T)**.
- DT reakcija fuzije daje najveći energetski dobitak na „najnižim“ temperaturama.



Fuzija na Zemlji

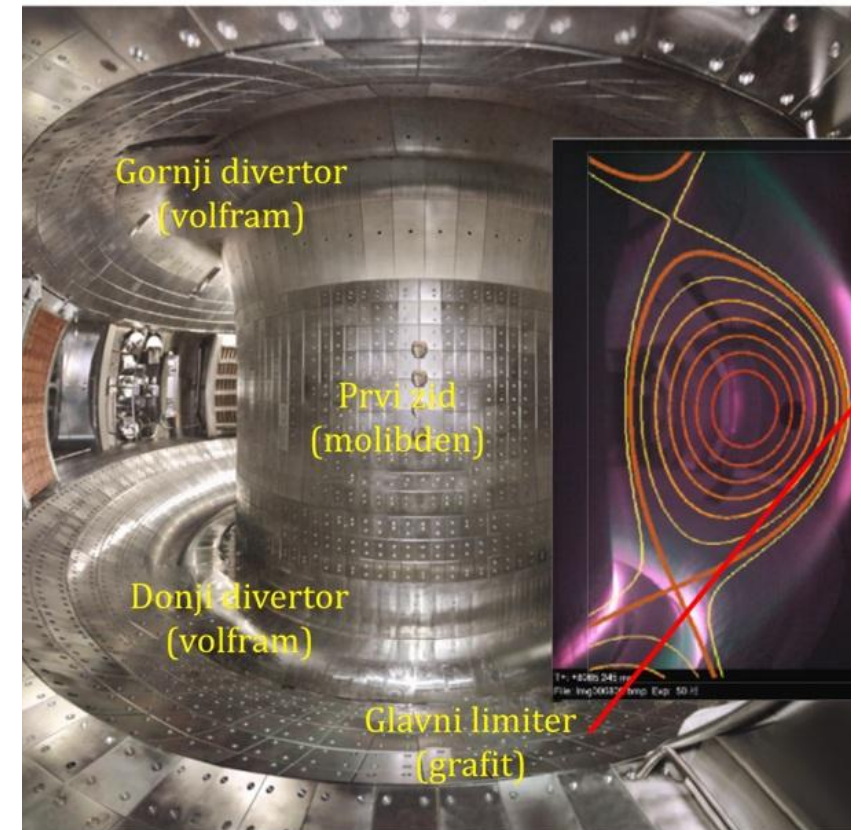
- Tri uslova moraju biti ispunjena da bi se fuzija postigla u laboratoriji:
 1. **visoka temperatura** (da bi se izazvali sudari visoke energije),
 2. **dovoljna gustina čestica plazme** (da bi se povećala verovatnoća da do sudara zaista dođe) i
 3. **dugo vreme konfiniranja** (da bi se plazma, koja ima tendenciju širenja, zadržala unutar definisane zapremine).
- U eksperimentalnom reaktoru ITER-u fuzija će biti postignuta u uređaju koji se naziva **tokamak**, a koji koristi magnetna polja za kontrolisanje plazme.



Konceptualni prikaz tokamaka

Interakcija plazme sa zidovima reaktora

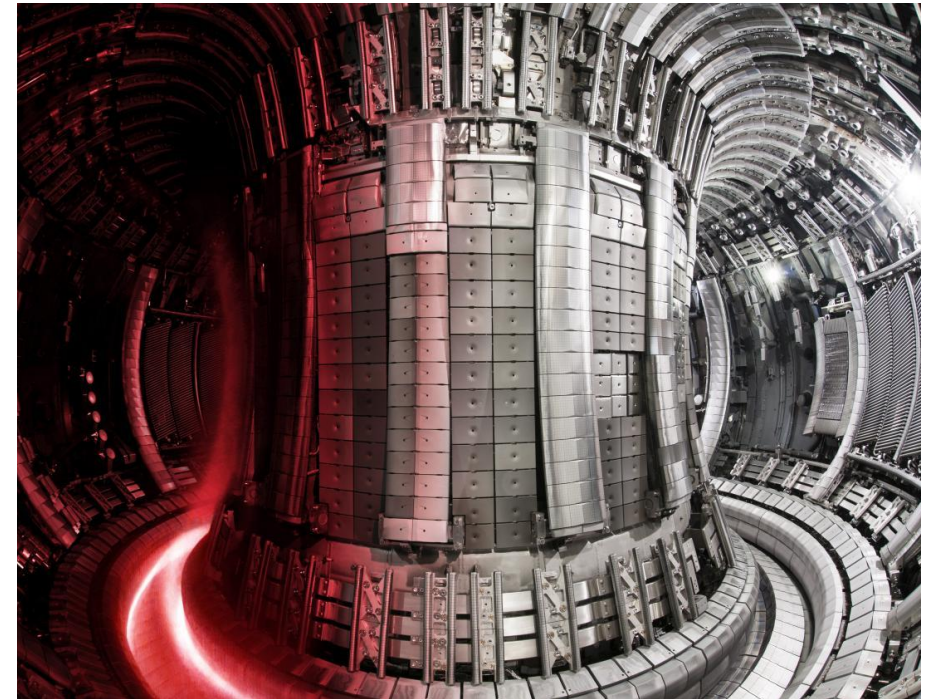
- Zidovi reaktora su bombardovani velikim fluksom čestica iz plazme što dovodi do erozije materijala koji dolaze u direktan kontakt sa plazmom, tzv. *plasma-facing components (PFC)*.
- Dolazi i do **depozicije nečistoća i goriva** na njima i unutar njih.
- Upravljanje zalihama tricijuma je jedan od velikih izazova u razvoju fuzione energije i **neophodno je pratiti koncentraciju zadržanog tricijuma na PFC-ovima**.
- Sa jedne strane, T je redak u prirodi i neophodno je smanjiti njegove gubitke, a sa druge strane je zbog radioaktivnosti rizik po sredinu.



Unutrašnjost EAST tokamaka u Kini

Interakcija plazme sa zidovima reaktora

- Analiza PFC-ova se može obavljati *ex situ* ili *in situ*.
- Metode *ex situ* analize podrazumevaju **demontiranje** delova reaktora radi laboratorijskog ispitivanja i **poseduju rezoluciju** potrebnu za preciznu detekciju vodonikovih izotopa.
- Razvijene *in situ* metode još uvek **nemaju potrebnu rezoluciju**, ali **ne zahtevaju demontažu** i vremenski su efikasnije.
- Šta je potrebna rezolucija?

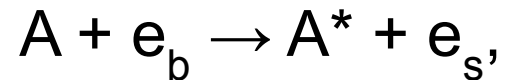


Unutrašnjost JET tokamaka u
Engleskoj

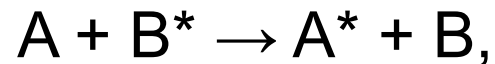
Ekscitacija i deekscitacija atoma

- Ako atomu dovedemo energiju, on prelazi iz osnovnog u pobuđeno stanje. Osnovni načini na koje se **ekscitacija** može odigrati su:

- **Ekscitacija sudarima I vrste**



- **Ekscitacija sudarima II vrste**

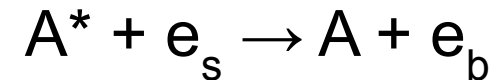


- **Fotoekscitacija**

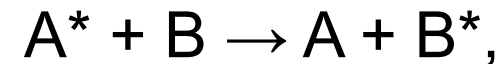


- Proces kojim se atom vraća u stanje niže energije naziva se **deekscitacijom**, i takođe se može odvijati na različite načine:

- **Deekscitacija sudarom sa elektronom:**



- **Deekscitacija sudarima II vrste:**

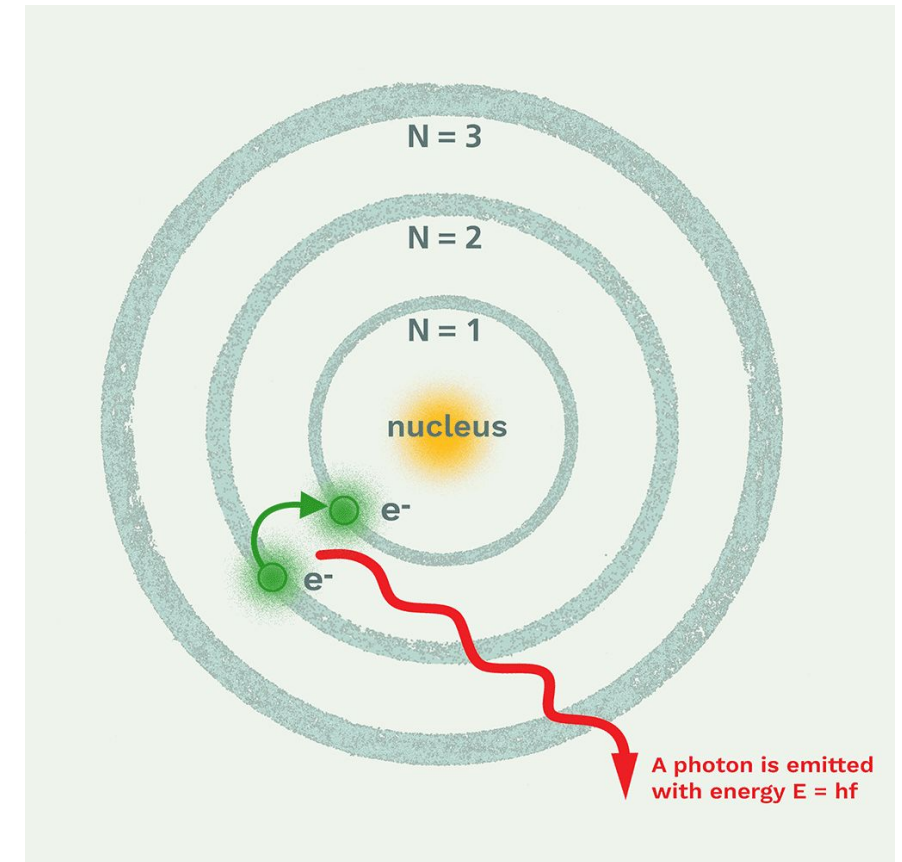


- **Radijativna deekscitacija:**



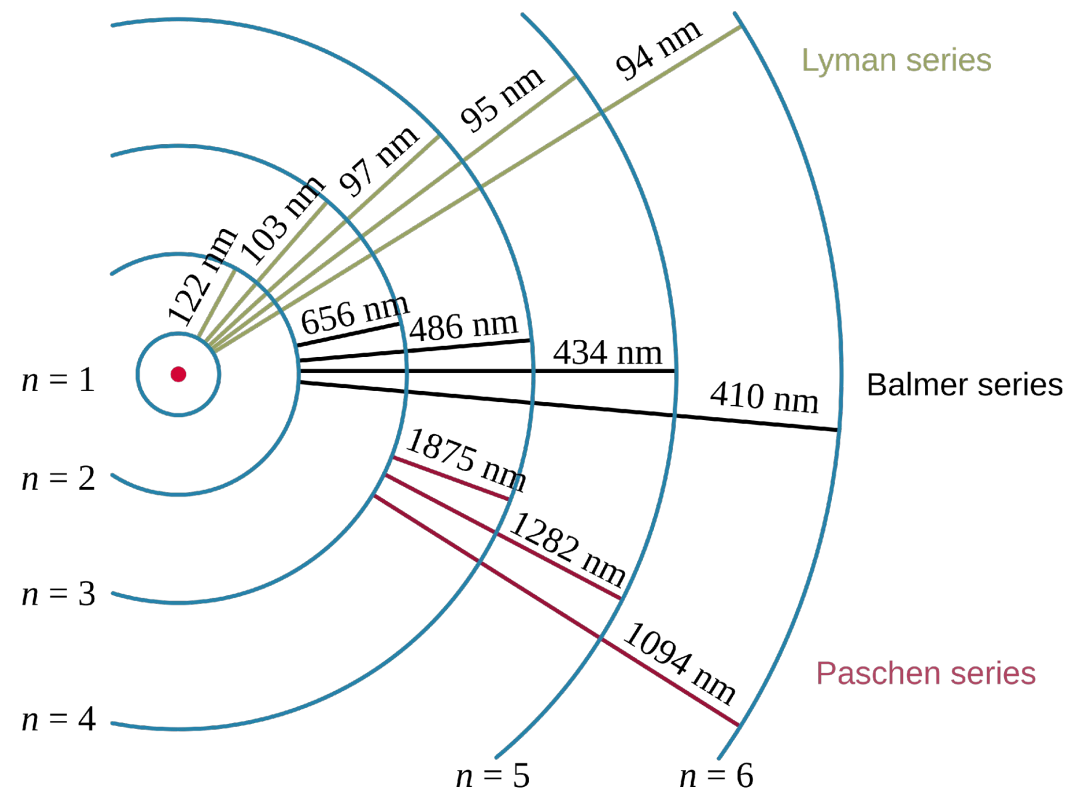
Spektralne linije. Borov model atoma

- Atomski sistem (atom, jon, molekul) se može zadržati samo u određenim stabilnim stanjima i u njima raspolaže energijama koje obrazuju diskretan niz vrednosti: $E_1, E_2, \dots E_n, \dots$
- Ako pri prelazu iz jednog stacionarnog stanja u drugo atomski sistem emituje ili apsorbuje foton, onda je takvo zračenje strogo određene talasne dužine, prilikom čega je **energija fotona određena razlikom energije sistema u početnom i krajnjem stanju prelaza**.
- Atomi različitih elemenata imaju različite energetske strukture → **svaki atom ima svoje specifične emisije** (i apsorpcione) linije.
- Ta osobina se može koristiti za identifikaciju elemenata u uzorku – **optička emisijska spektroskopija (OES)**.

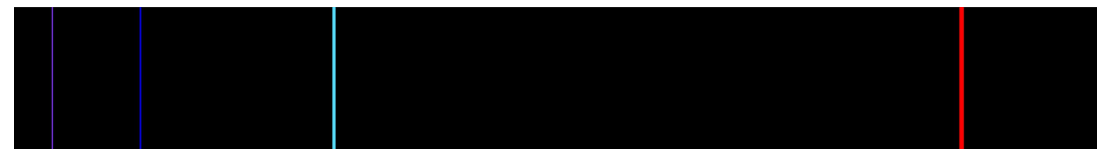


Spektralne linije vodonika

- Linije se grupišu u serije. Kod vodonika to su: Lajmanova, Balmerova, Pašenova, Breketova itd.
- 4 linije Balmerove serije se nalaze u vidljivom delu spektra.
- H_α je možda najznačajnija spektralna linija koja se koristi za ispitivanje prisustva vodonika.



410 nm 434 nm 486 nm 656 nm



H_δ H_γ

H_β

H_α

Spektralne linije vodonikovih izotopa

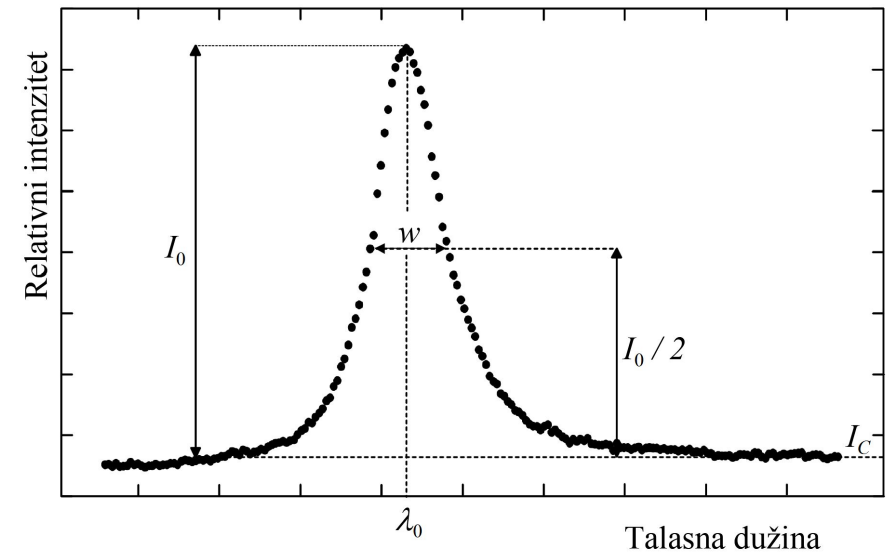
- Zbog razlike u masama jezgara deuterijuma i tricijuma u odnosu na protijum, energetske strukture se malo razlikuju.
- Spektralne linije su pomerene ka manjim vrednostima talasnih dužina.

656.28 nm	656.11 nm	656.05 nm

- Razlika između talasnih dužina H_{α} i D_{α} je oko 0.17 nm, dok je razlika između D_{α} i T_{α} **značajno manja** - oko 0.06 nm.

Kako da “navedemo” atome na emisiju?

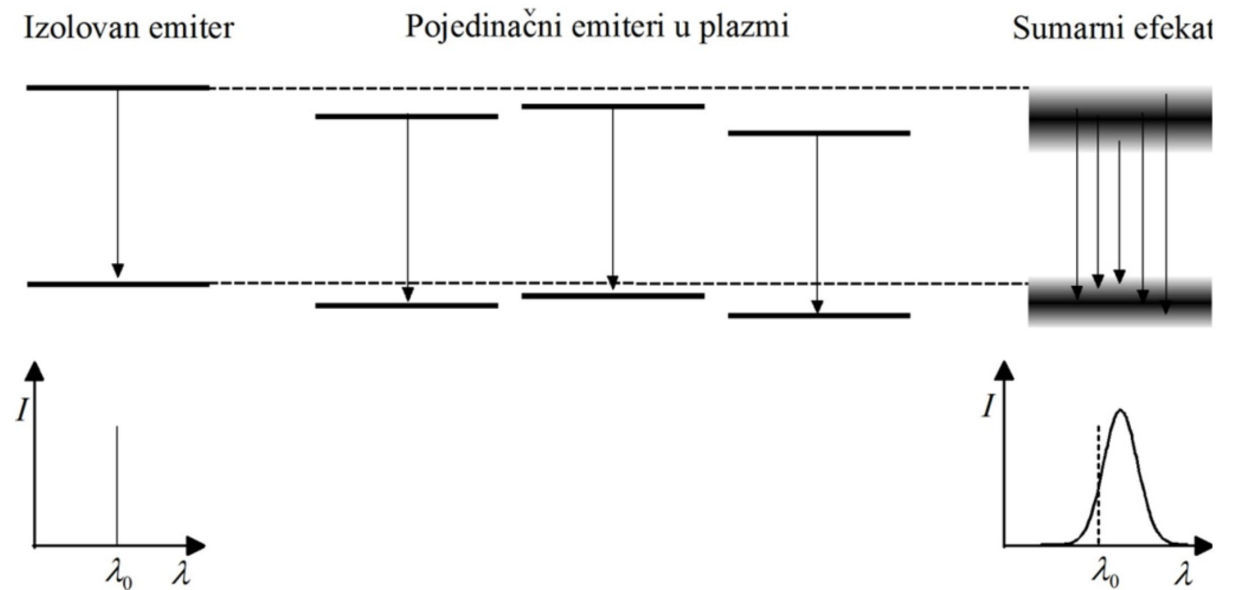
- Koristimo plazmu kao ekscitacioni izvor za uzorak koji ispitujemo.
- Interakcije u plazmi dovode do pomeranja energetske nivoa atoma, tako da emitovano zračenje nije strogo monohromatsko.
- Mehanizmi koji dovode do širenja spektralnih linija su:
 1. Prirodno širenje (usled konačnog srednjeg vremena života atoma u pobuđenom stanju) - zanemarljivo
 2. **Doplerovo širenje** (zbog kretanja atoma emitira u odnosu na sistem posmatranja) – zavisi od **temperature** plazme
 3. **Širenje usled pritiska** (zbog interakcije emitira sa okolnim neutralnim i naelektrisanim česticama) – zavisi od **koncentracije** čestica u plazmi
 4. **Instrumentalno širenje** (svaka eksperimentalno snimljena linija biva dodatno proširena prolaskom zračenja kroz spektrometar) – zavisi od karakteristika spektrometra



Poluširina – širina na polovini intenziteta linije (**FWHM** – *full width at half maximum*)

Širenje usled pritiska. Štarkovo širenje

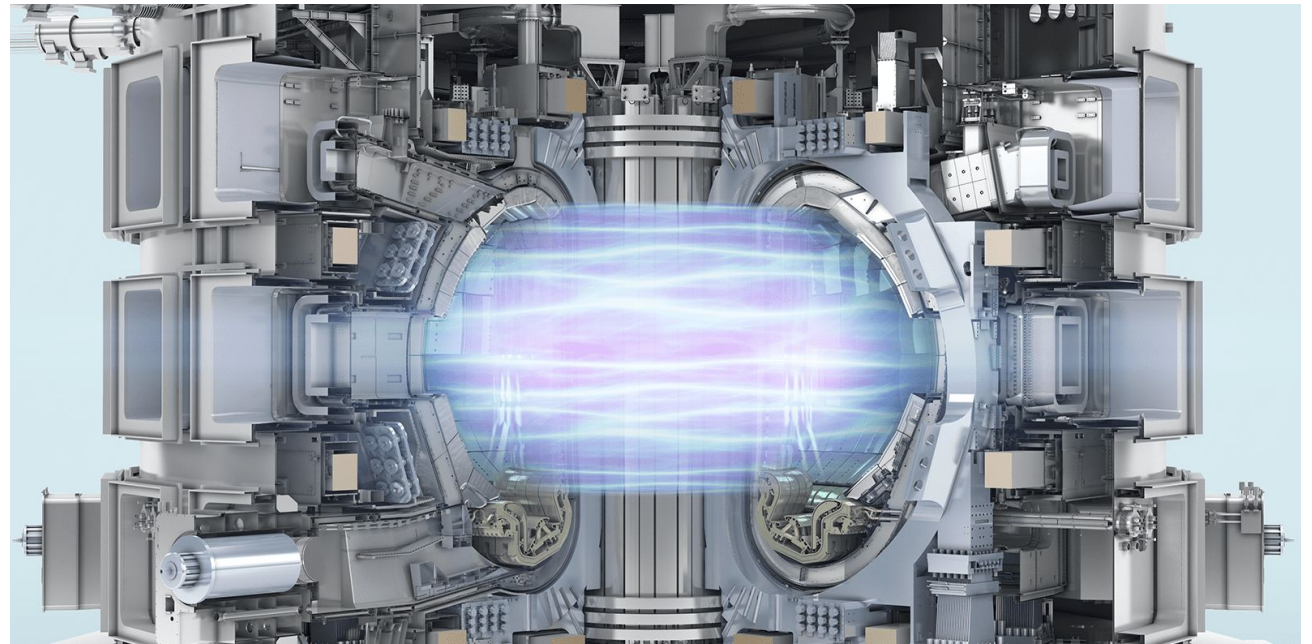
- Postoje različiti mehanizmi širenja usled pritiska, a kada su perturbirane naelektrisane čestice priča se o Štarkovom širenju.
- Pod dejstvom električnog polja dolazi do cepanja i pomeranja energijskih nivoa atoma ili jona – Štarkov efekat.
- U plazmi se nalazi veliki broj istih emitera i električno polje je promenljivo u prostoru i vremenu → detektuje se, umesto cepanja, širenje spektralnih linija, uz moguće pomeranje njihovog centra.
- **Što je veća koncentracija naelektrisanih čestica u plazmi (elektroni i joni), to je izraženije Štarkovo širenje.**



Detekcija vodonikovih izotopa

- Veoma bitno za rad fuzionog reaktora da to bude *in situ* metoda.
- Metode emisije spektroskopije su pogodni kandidati za takva merenja.
- Da bi se detektovala sva tri izotopa istovremeno neophodno je **obezbediti uslove za dobijanje veoma uskih spektralnih linija**.
- Balmerove alfa linije su najpogodnije za posmatranje (H_α , D_α i T_α).

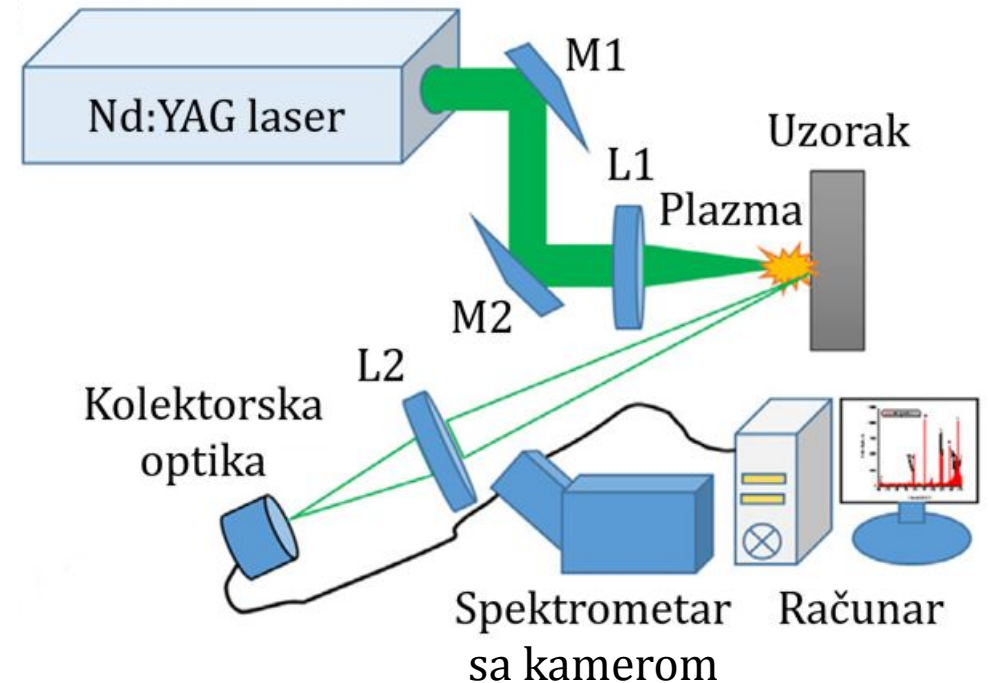
656.28 nm	656.11 nm	656.05 nm



Poprečni presek
ITER-a

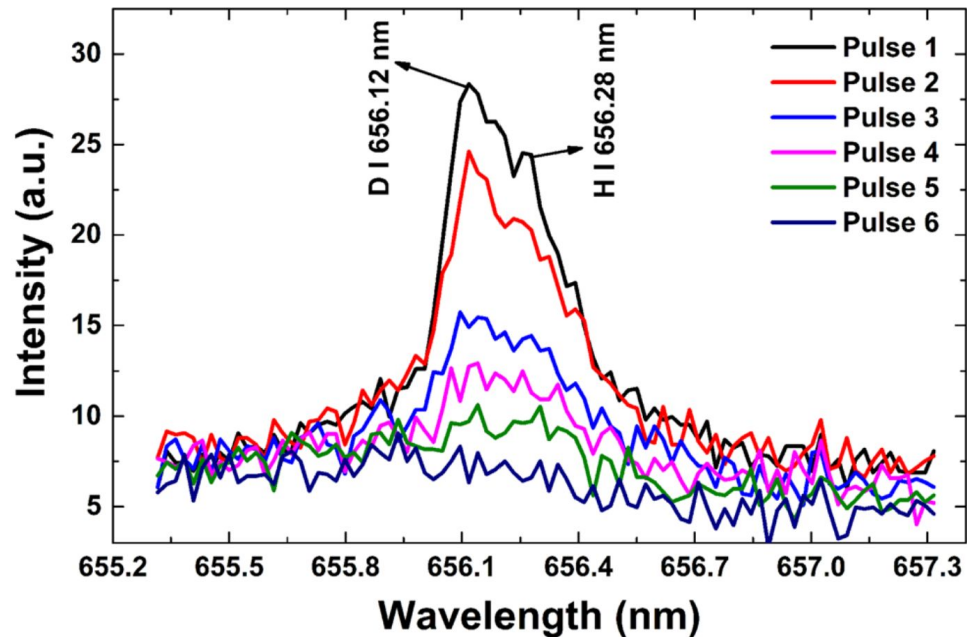
LIBS – *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*

- Trenutni fokus istraživanja za *in situ* analizu PFC-ova.
- Ima brojne pozitivne strane:
 - minimalno destruktivna tehnika
 - nije neophodno tretiranje uzorka pre analize
 - jednostavna postavka
 - primenjiva na atmosferskom kao i na niskom pritisku ili u vakuumu
 - demonstrirana je *in situ* primena u reaktoru

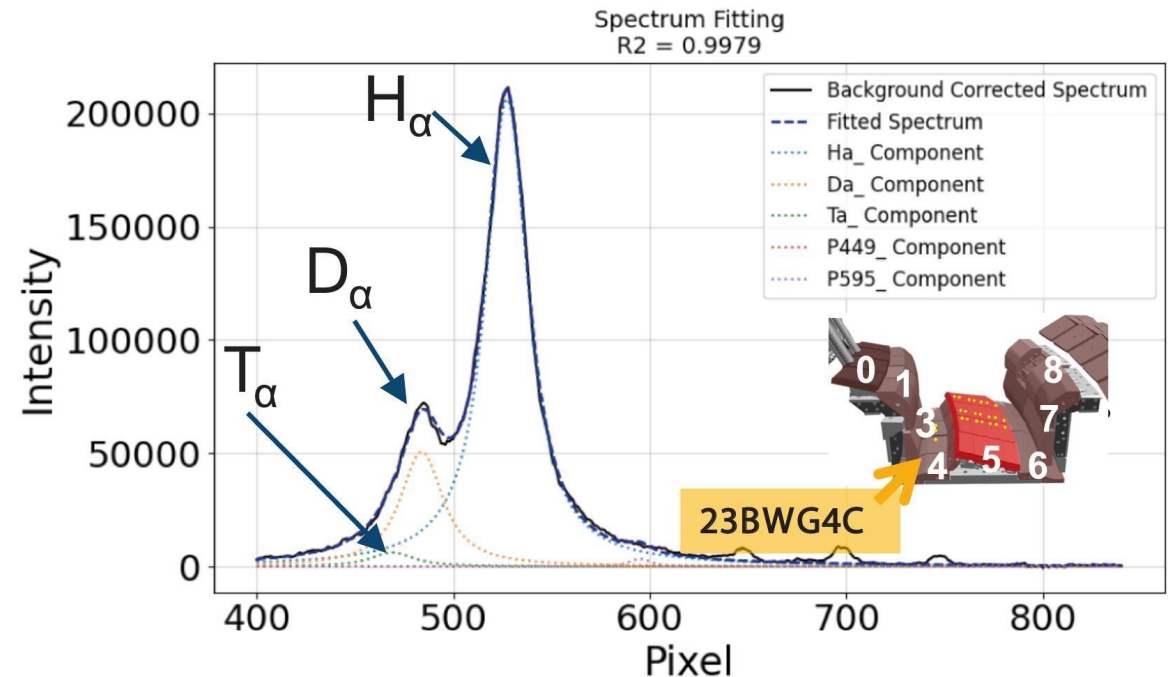


LIBS – *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*

- Međutim, spektri izgledaju ovako:



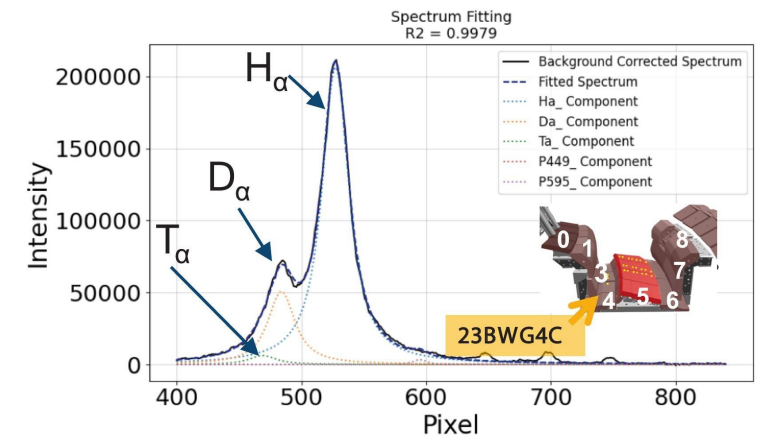
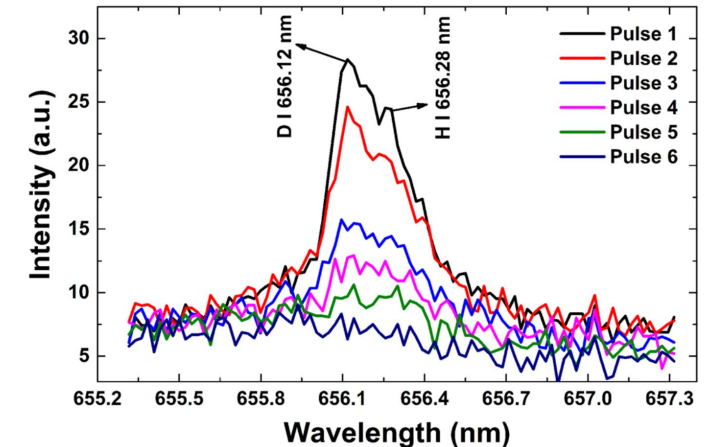
LIBS u vakuumu na EAST-u u Kini



LIBS na atmosferskom pritisku argona na JET-u u Engleskoj

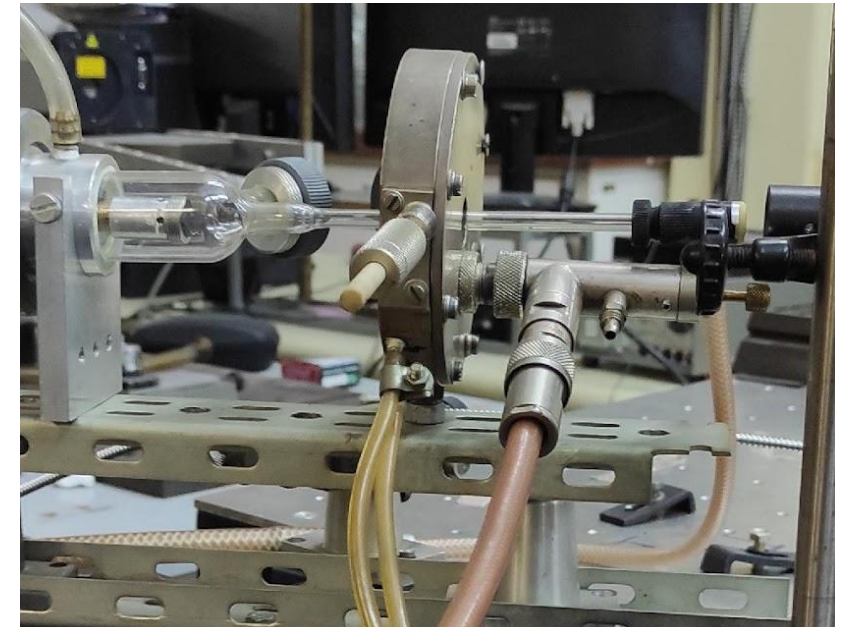
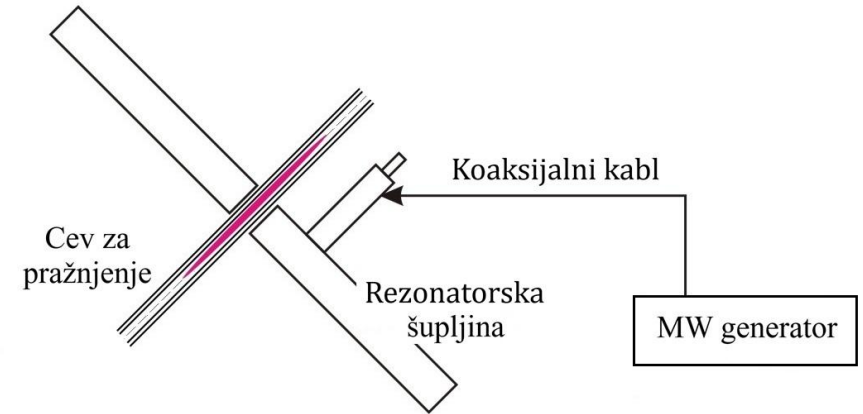
Zašto?

- Glavni problem kod analize izotopa vodonika LIBS-om jeste **veliko Štarkovo širenje linija zbog visoke koncentracije elektrona u plazmi**.
- U vremenskom prozoru koji se obično koristi za snimanje LIBS signala (1 – 10 μ s od laserskog impulsa), širine H_α , D_α i T_α su značajno veće od razmaka između njih.
- U kasnijim fazama evolucije plazme linije su uže, ali im intenziteti slabe i one se stapaju sa šumom.
- U do sada objavljenoj literaturi **ne postoje** zadovoljavajući rezultati za preciznu istovremenu detekciju sva tri izotopa primenom LIBS tehnike.



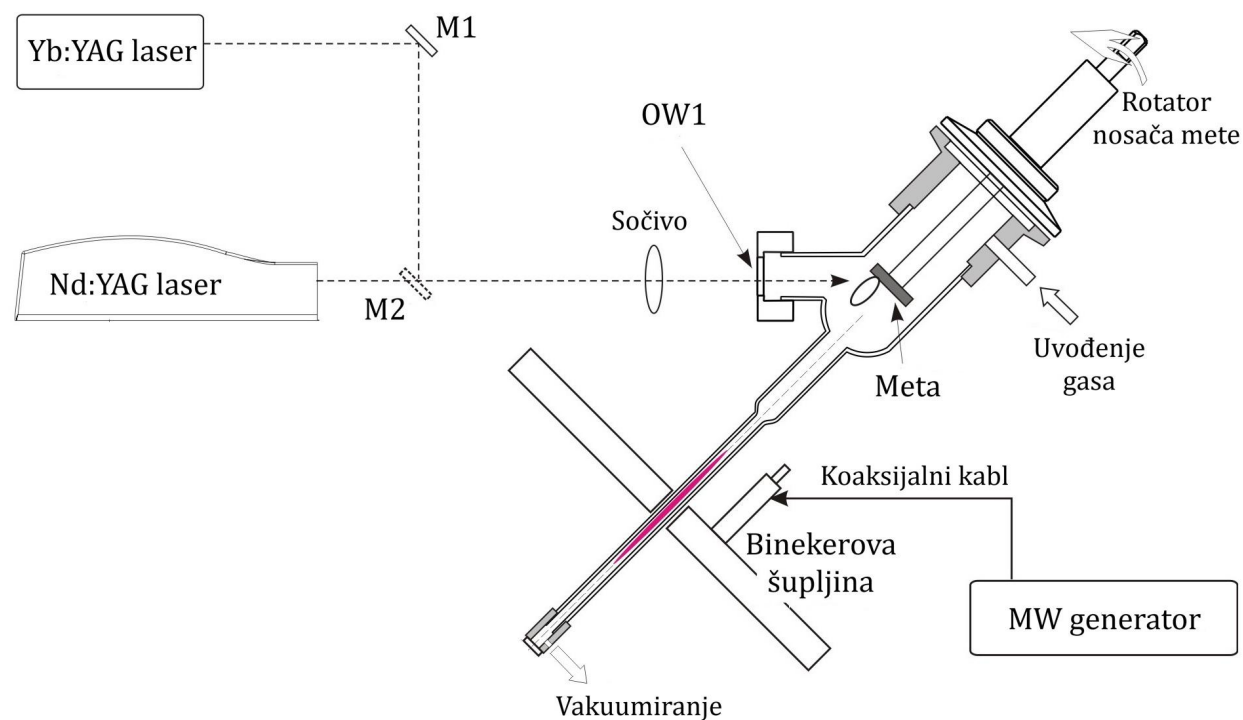
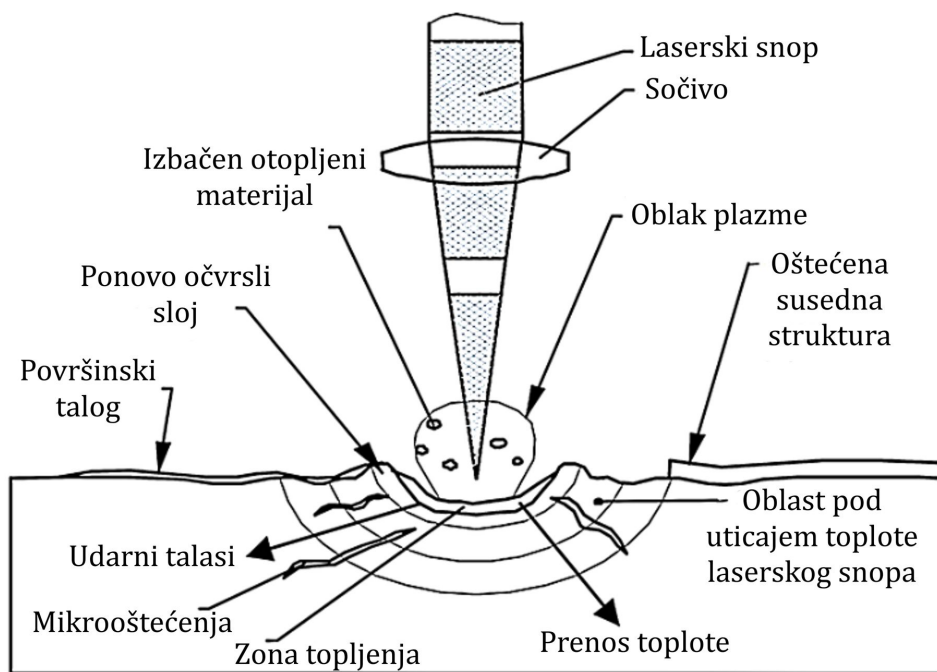
MIP – mikrotalasno indukovana plazma

- Koristimo je kao **ekscitacioni izvor** kako bismo dobili emisiju spektralnih linija.
- MIP na atmosferskom i niskom pritisku ima **dovoljno nisku koncentraciju elektrona** da se ostvari potrebna rezolucija merenja.
- MW izvor je magnetron frekvencije 2.45 GHz (kao i mikrotalasna).
- Šupljina prenosi snagu sa mikrotalasnog izvora na gas koji se nalazi u staklenoj cevi za pražnjenje, odnosno pojačava električno polje u zapremini gasa i stvara plazmu.



Laserska ablacija i desorpcija

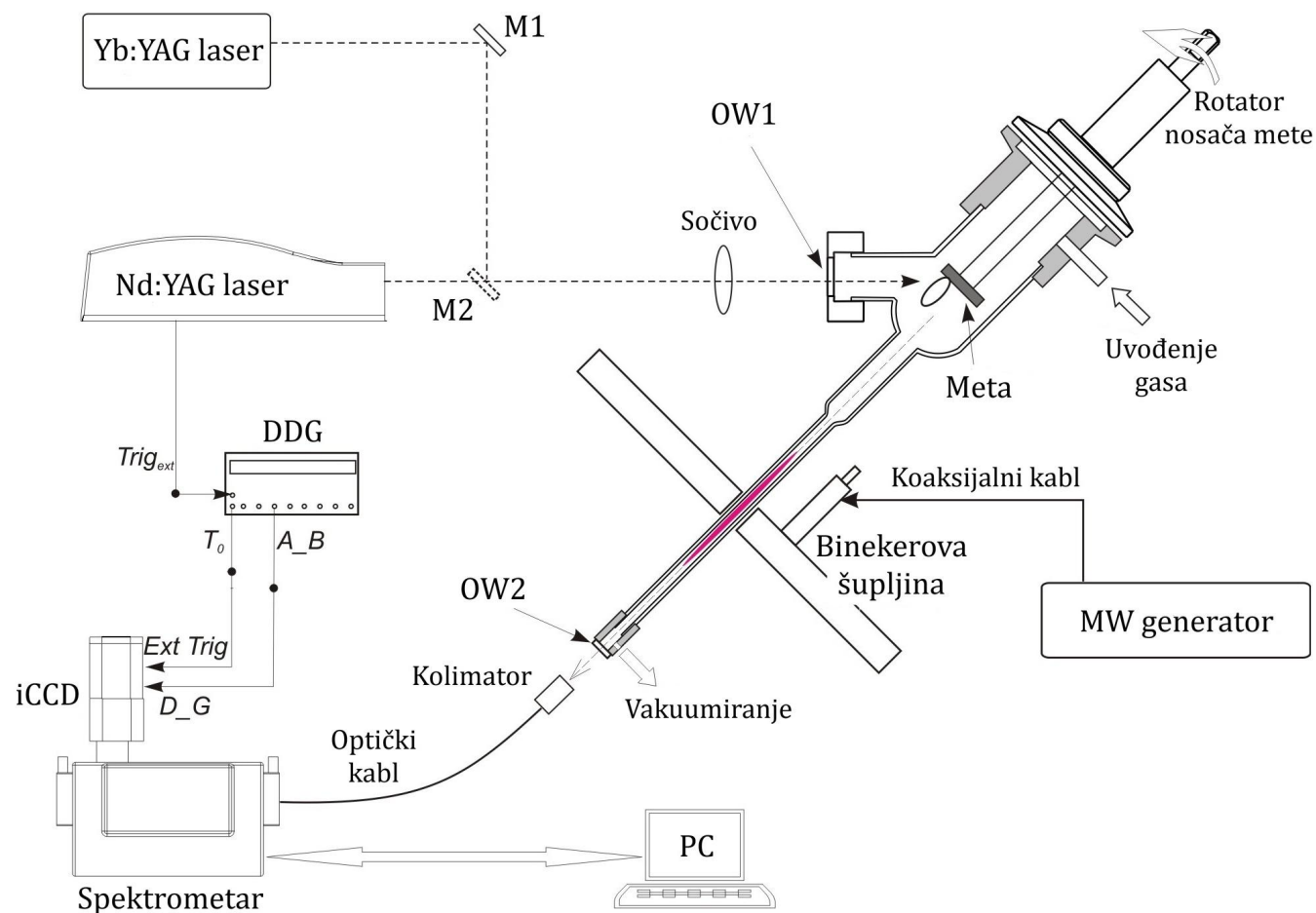
- Koristimo ove metode za uzorkovanje materijala
- Desorpcija je u našem slučaju termalne prirode.
- Za LA se koriste laseri veće energije, dok se LID uvek dešava ispod praga potrebnog za LA.
- Eksperimenti su rađeni na niskom pritisku argona (10-20 mbar).
- Uz pomoć protoka gasa uzorkovani materijal je dolazio do plazme.



Kompletna postavka

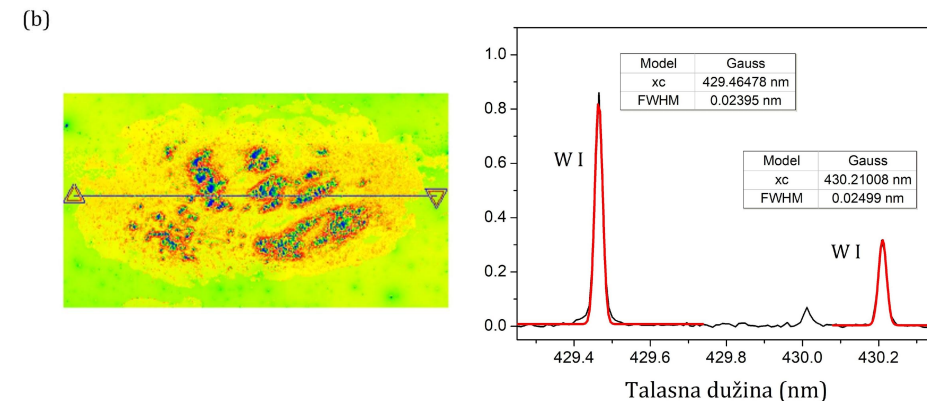
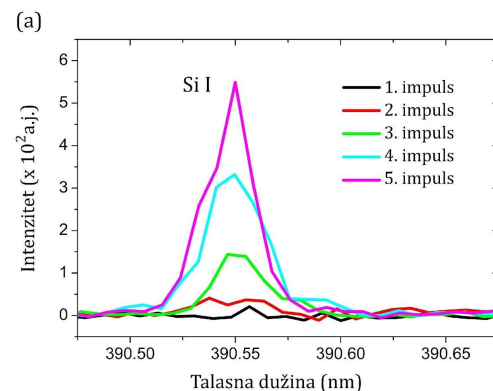
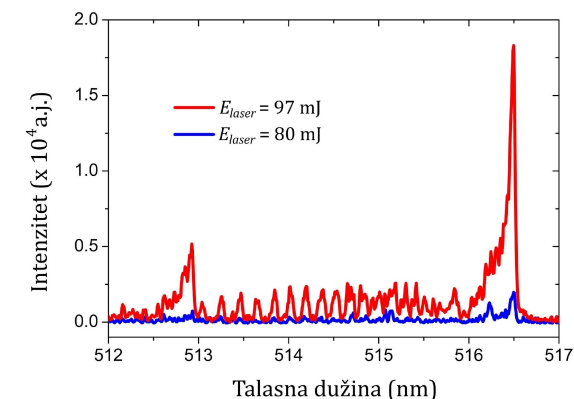
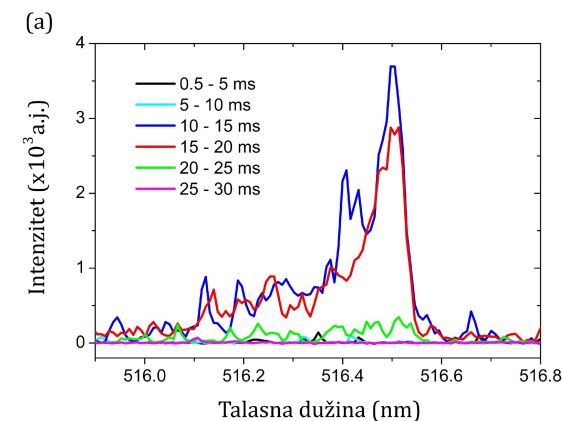
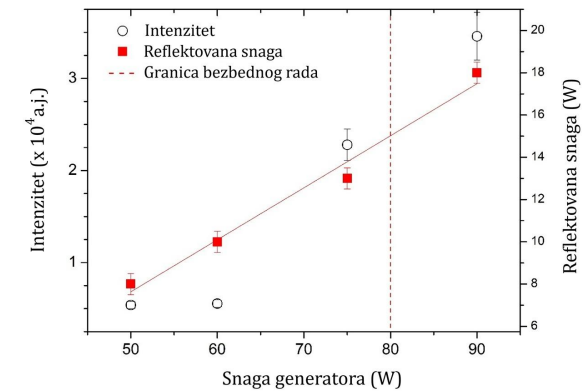
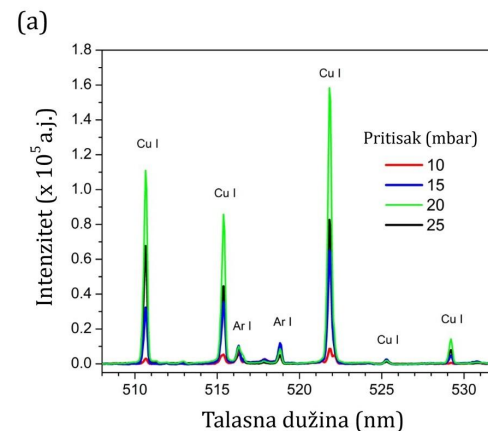
- Merni sistem:

1. kolimator skuplja emisiju iz plazme u optički kabl
2. spektrometar visoke rezolucije razlaže prikupljenu svetlost po talasnim dužinama
3. ICCD kamera snima odabrani deo tog spektra
4. DDG-om se radi sinhronizacija snimanja kamere sa okidanjem lasera
5. snimljeni spektar se očitava u softveru na računaru



Optimizacija parametara

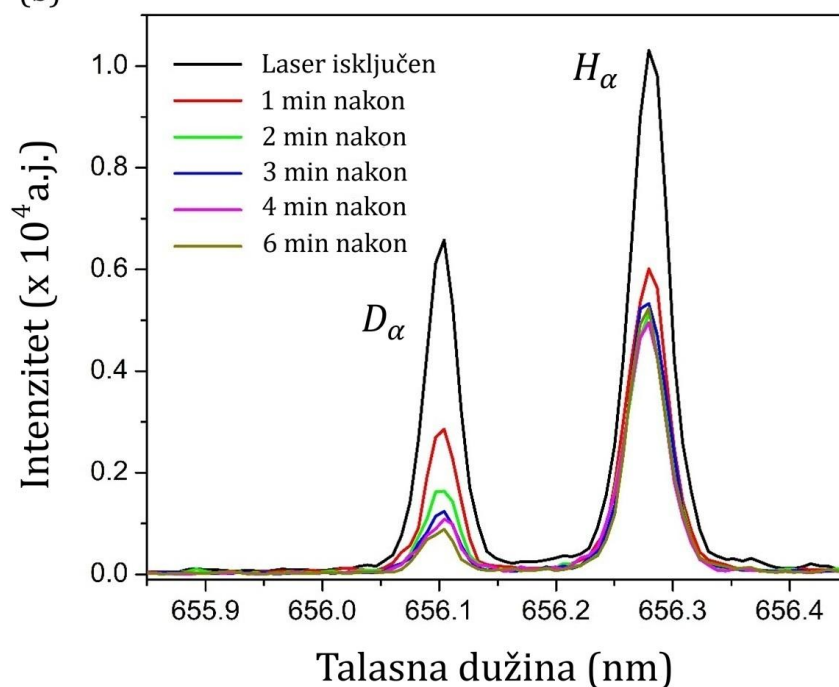
- Većina istraživanja se svodi na optimizaciju parametara za finalna merenja.
- Korišćene razne mete: Cu, W, C + CH₄ na Si substratu.
- Bitni parametri: pritisak gasa, snaga MW izvora, delay i gate kamere, energija lasera, ablation rate, veličina laserskog spota na meti, širina ulaznog razreza spektrometra itd.



Detekcija deuterijuma

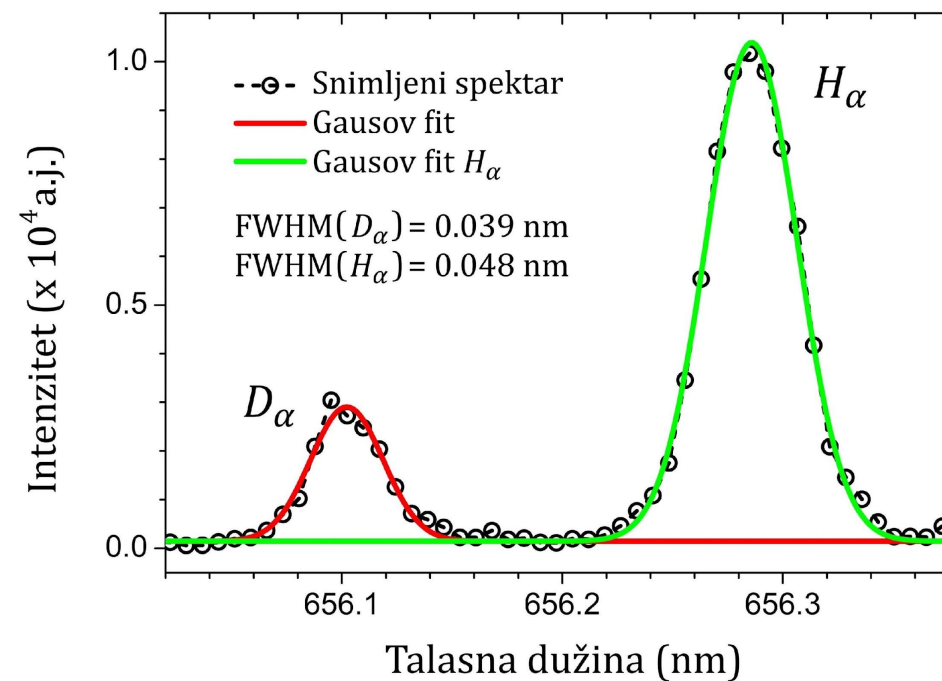
LID

(b)



FWHM (D_α) = 0.033 nm
FWHM (H_α) = 0.038 nm

LA

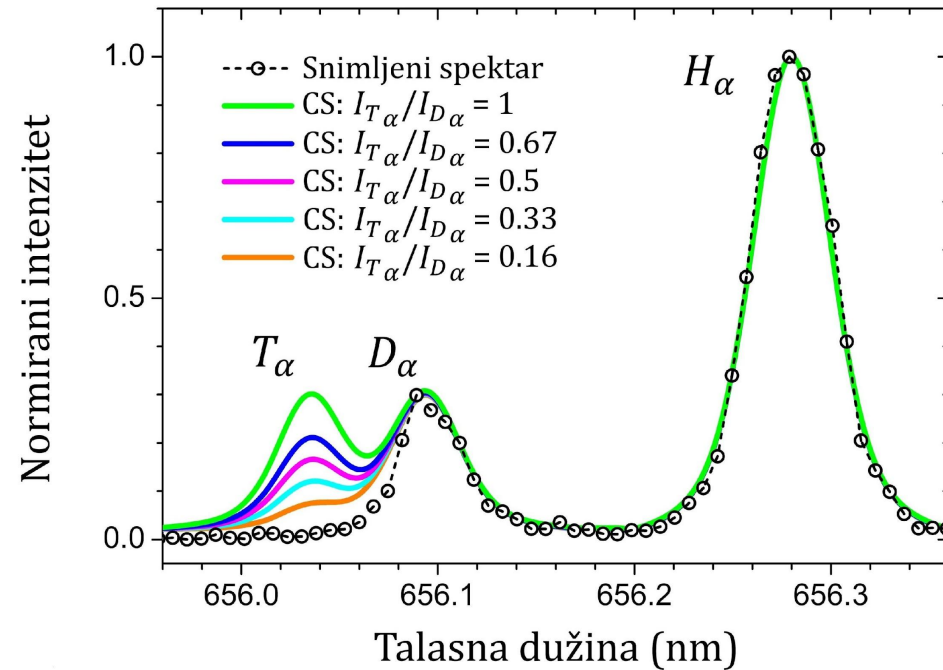


Mete:

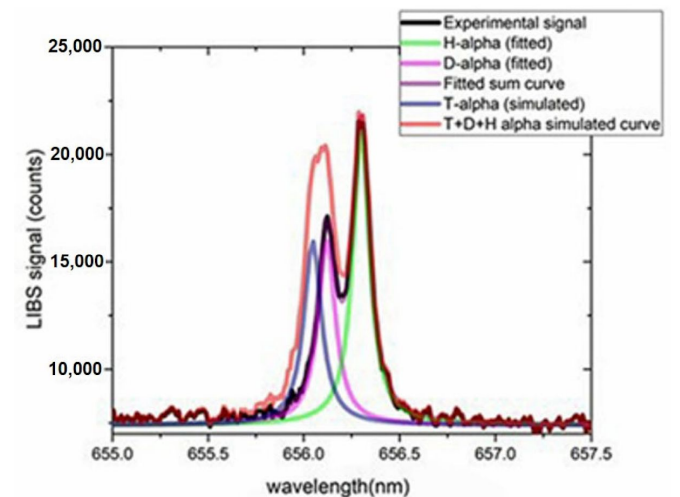
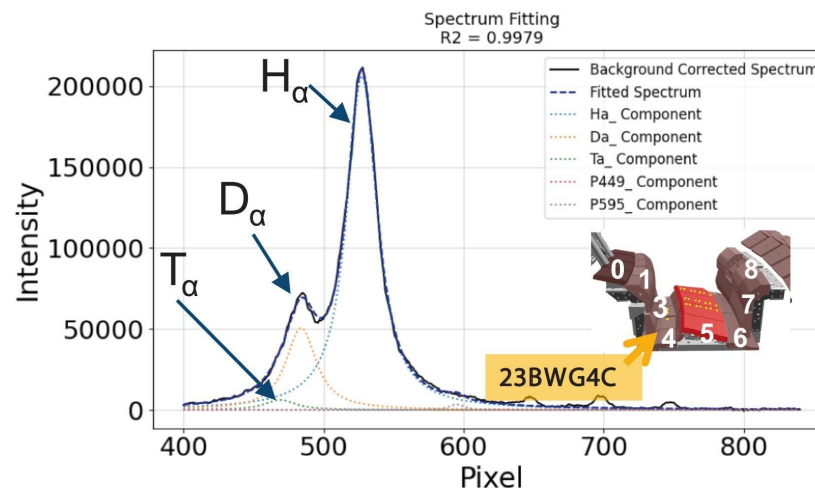
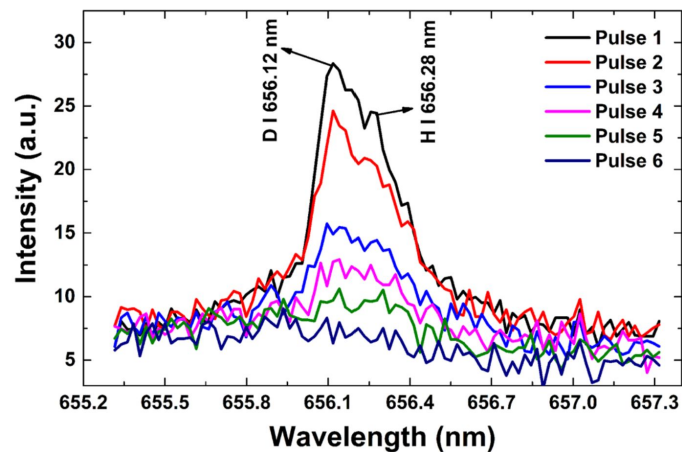
LID: grafitni prah sa H_2O i D_2O
LA: sloj C + D na Si

Kompjuterski simulirani spektri

- Dobijeni spektri malo potcenjuju stvarnu rezoluciju.

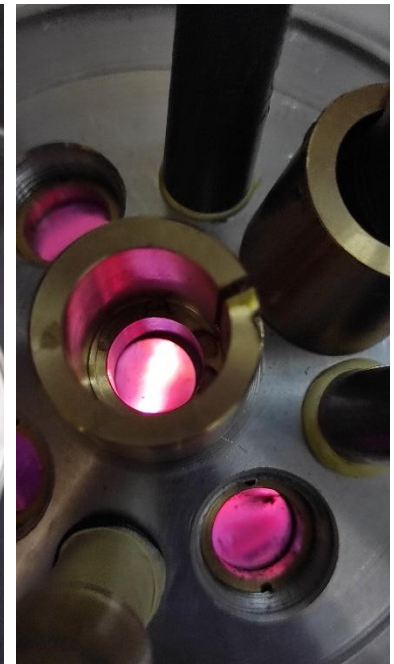
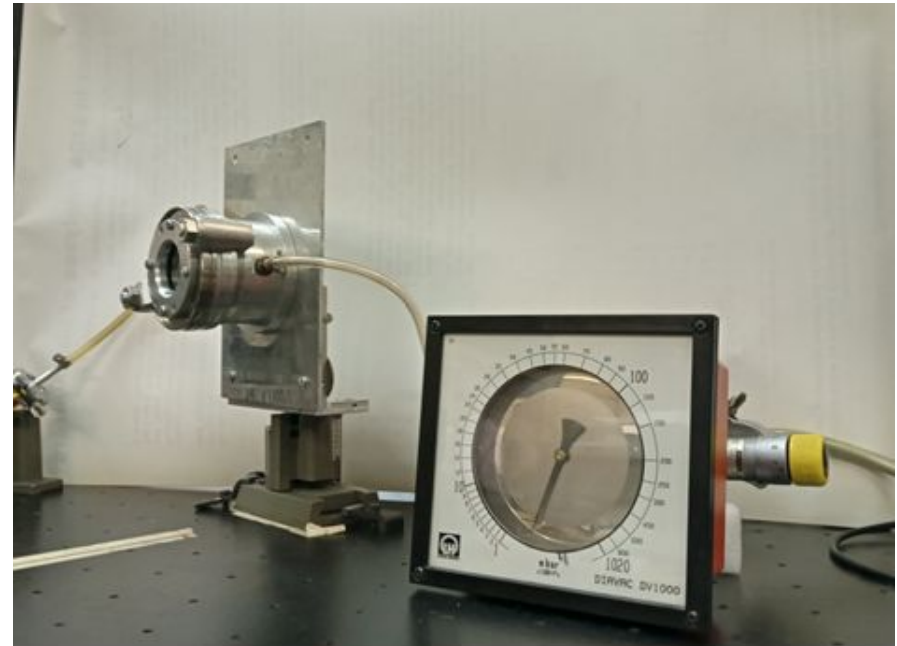


FWHM:
 $w_{H\alpha} = 0.047 \text{ nm}$
 $w_{D\alpha} = 0.042 \text{ nm}$
 $w_{T\alpha} = 0.041 \text{ nm}$



Za budućnost

- Postavljanje eksperimenta u ustanovi sa dozvolom za rukovanje tricijumom. Detekcija tricijuma.
- Razvijanje *in situ* postavke.



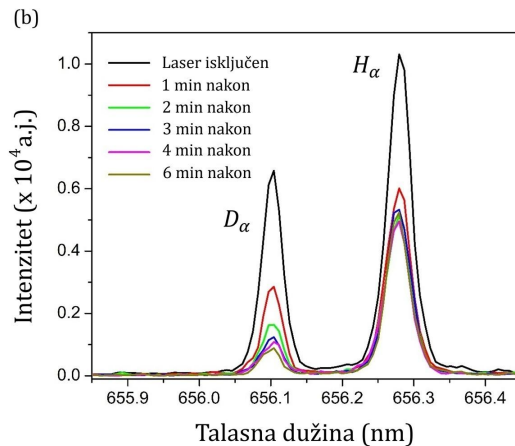


Laboratorija za plazmu i lasere

Biljana Stankov, Milivoje Ivković, Ivan Traparić, Stanko Milanović, Vladimir Gavrilović, Nenad Sakan i Milica Vinić

Procena istovremene detekcije D i T

LID



- Kritična vrednost FWHM (D_α) pri kojoj bi D_α i T_α linije i dalje bile razdvojene (prema Rejljevom kriterijumu) zavisi od odnosa intenziteta ove dve linije $R = I(T_\alpha)/I(D_\alpha)$:

$$FWHM_{cr} = 0.0599 - 0.0388 \times e^{-1.765 \times R}$$

- Prva metoda omogućuje istovremenu preciznu detekciju D i T kada je odnos njihovih intenziteta između 0.2 i 1.
- Druga metoda za odnos intenziteta između 0.35 i 1.

LA

