

Angularni moment fizijskih fragmenata

Patricija Kranjčić

Samostalni seminar iz istraživanja u fizici

MENTOR: dr. sc. Petar Marević

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

3. - 5. veljače 2025.

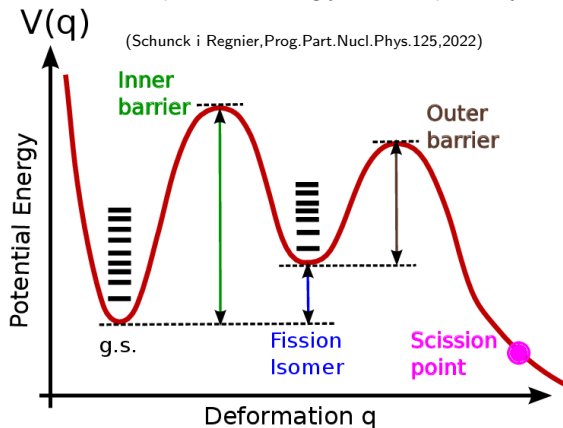


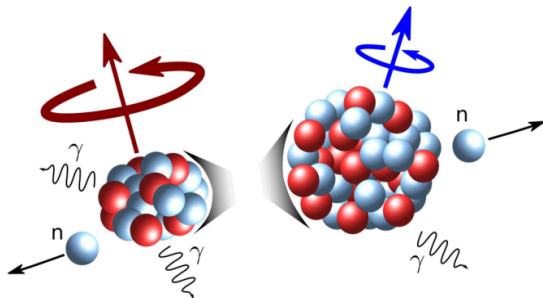
1. Uvod i motivacija
2. Teorijski okvir
3. Račun i rezultati
4. Zaključak

1. Uvod i motivacija

► nuklearna fisija:

- proces u kojem se teška atomska jezgra raspada na dva ili više fragmenata
- spontana ili inducirana
- proces deformacije jezgre kao kapljice tekućine
- višedimenzionalna površina energije → 1D put fisije s dvije barijere





► fragmenti:

- pobuđena stanja, određene deformacije i raspodjele angularnih momenata
- deekscitacija emisijom neutrona, fotona, β -raspadima

► mikroskopski opis:

- teorija nuklearnih energijskih funkcionala gustoće

- ▶ razumijevanje fisije ključno za: temeljnu i primijenjenu znanost, proizvodnju energije, astrofiziku
- ▶ početna raspodjela angularnog momenta u fragmentima ima značajan utjecaj na proces njihove deekscitacije
- ▶ raspodjele za čitav spektar formiranih fragmenata, sastavni dio statističkih modela koji opisuju deekscitaciju fragmenata

2. Teorijski okvir

Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) teorija

- ▶ proširenje Hartree-Fock (HF) teorije: korelacije sparivanja nužne za opis fisije
- ▶ Bogoljubovljeva transformacija i kvazičestice:

$$\beta_{\mu} = \sum_m [U_{\mu m}^{\dagger} c_m + V_{\mu m}^{\dagger} c_m^{\dagger}], \quad \beta_{\mu}^{\dagger} = \sum_m [V_{\mu m}^T c_m + U_{\mu m}^T c_m^{\dagger}]$$

- ▶ HFB valne funkcije:

$$\beta_{\mu} |\Phi\rangle = 0, \quad |\Phi\rangle = \prod_{\mu} \beta_{\mu} |0\rangle$$

- ▶ Hamiltonijan:

$$H = \sum_{ij} t_{ij} c_i^{\dagger} c_j + \frac{1}{4} \sum_{ijkl} \bar{v}_{ijkl} c_i^{\dagger} c_j^{\dagger} c_l c_k$$

Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) teorija

- ▶ energijski funkcional:

$$\mathcal{E} = \sum_{ij} t_{ij} \rho_{ji} + \frac{1}{2} \sum_{ijkl} \bar{v}_{ijkl} \rho_{lj} \rho_{ki} + \frac{1}{4} \sum_{ijkl} \bar{v}_{ijkl} \kappa_{ij}^* \kappa_{kl}$$

- ▶ HFB jednadžbe:

$$\begin{pmatrix} h & \Delta \\ -\Delta^* & -h^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_\mu \\ V_\mu \end{pmatrix} = E_\mu \begin{pmatrix} U_\mu \\ V_\mu \end{pmatrix}$$

- ▶ polja:

$$h_{nm} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \rho_{mn}}, \quad \Delta_{mn} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \kappa_{mn}^*}$$

Ponovno uspostavljanje simetrija

- ▶ slamanje simetrija sustava zbog aproksimacija srednjeg polja
- ▶ ponovno uspostavljene primjenom elemenata grupe simetrija
- ▶ korištena projekcija nakon varijacije (postoji i varijacija nakon projekcije)
- ▶ projekcija na dobar angularni moment (AMP)
- ▶ projekcija na dobar broj čestica (PNP)

Projekcija na dobar angularni moment

- ▶ operator:

$$\hat{P}_{MK}^J = \frac{2J+1}{16\pi^2} \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\pi d\beta \sin\beta \int_0^{4\pi} d\gamma D_{MK}^{J*}(\Omega) \hat{R}(\Omega),$$

$$\hat{R}(\Omega) = e^{-i\alpha\hat{J}_z} e^{-i\beta\hat{J}_y} e^{-i\gamma\hat{J}_z}$$

- ▶ raspodjela angularnog momenta u fragmentima:

$$|c_q(J_F)|^2 = \frac{2J_F+1}{2} \int_0^\pi d\beta \sin\beta d_{00}^{J_F*}(\beta) \mathcal{N}_q^F(\beta),$$

- ▶ preklop:

$$\mathcal{N}_q^F(\beta) = \langle \Phi_q | \exp(-i\beta\hat{J}_y^F) | \Phi_q \rangle$$

Projekcija na dobar broj čestica

- ▶ operator:

$$\hat{P}^N = \frac{1}{2\pi} \int d\phi e^{-i\phi(\hat{N}-N)}$$

- ▶ raspodjela broja protona i neutrona u fragmentima:

$$|c_q(N_F, Z_F)|^2 = \langle \Phi_q | \hat{P}^{N_F} \hat{P}^{Z_F} \hat{P}^{N_0} \hat{P}^{Z_0} | \Phi_q \rangle$$

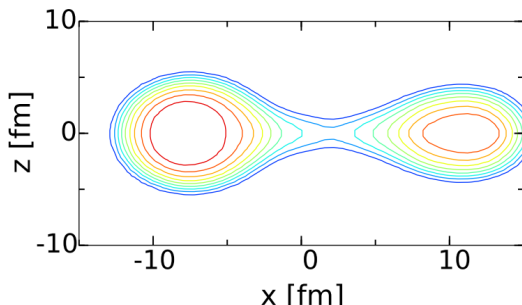
$$|c_q(N_F)|^2 = \sum_{Z_F} |c_q(N_F, Z_F)|^2,$$

$$|c_q(Z_F)|^2 = \sum_{N_F} |c_q(N_F, Z_F)|^2.$$

3. Račun i rezultati

- ▶ računalni program HFBTHO
- ▶ parametrizacija funkcionala gustoće: Skyrme SkM* interakcija
- ▶ valne funkcije razvijene u bazi deformiranog harmoničkog oscilatora od 1200 stanja iz 30 oscilatorskih ljusaka
- ▶ broj kutova β pri AMP je 60
- ▶ broj kutova ϕ pri PNP je 31

Odabir konfiguracija

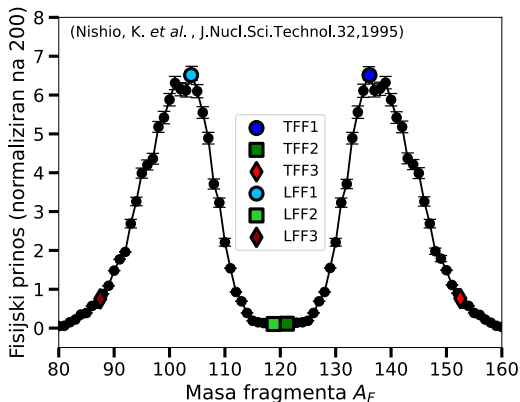


- ▶ račun proveden za tri konfiguracije na liniji cijepanja jezgre ^{240}Pu (neutronska inducirana fisija jezgre ^{239}Pu)
- ▶ ograničili kvadrupolni i oktopolni moment pri računu HFB konfiguracija
- ▶ masa i broj nukleona dobiveni integracijom jednočestične gustoće

Odabir konfiguracija

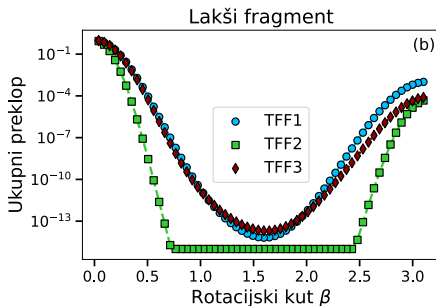
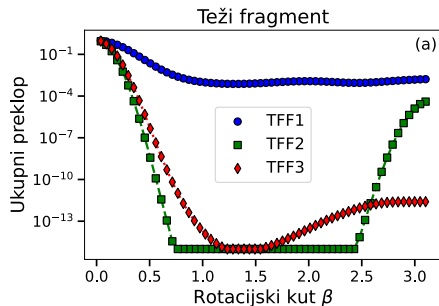
Konfiguracija fizijskih fragmenata	FF1		FF2		FF3	
Teži / lakši fizijski fragment	TFF1	LFF1	TFF2	LFF2	TFF3	LFF3
Masa fragmenta A_F	136.10	103.90	121.20	118.80	152.51	87.49
Broj protona Z_F	52.43	41.57	47.43	46.57	89.24	34.76
Broj neutrona N_F	83.67	62.33	73.77	72.23	63.27	52.73
Kvadrupolni moment q_{20} [b]	4.62	13.5	27.35	27.06	18.35	12.24
Oktupolni moment q_{30} [$b^{3/2}$]	1.07	-1.14	2.25	-2.22	4.19	-1.30
Parametar deformacije β_2^F	0.12	0.54	0.85	0.86	0.39	0.65

Fisijski prinos



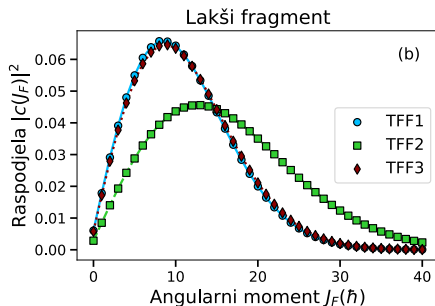
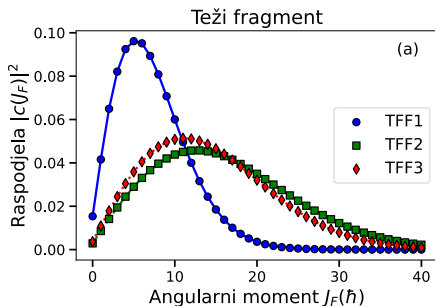
- ▶ FF1 blizu najvjerojatnije fragmentacije
- ▶ FF2 u blizini potpuno simetrične fisije
- ▶ FF3 slučaj velike asimetrije u raspadu

Ukupni preklap



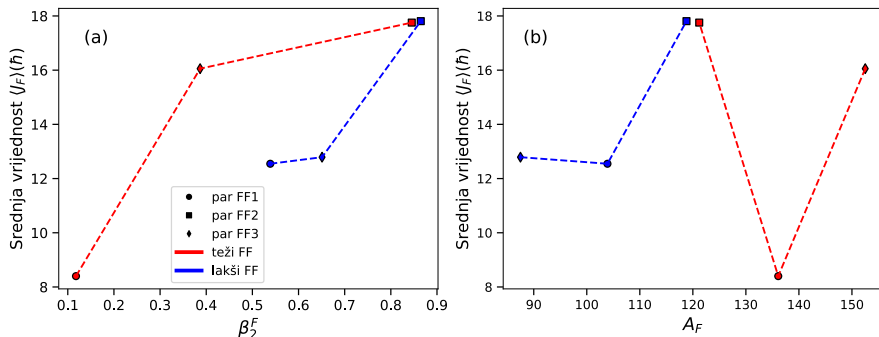
- preklopi su realni
- sporije padaju za manje deformirane konfiguracije
- samo manji rotacijski kutovi relevantni

Raspodjele angularnog momenta



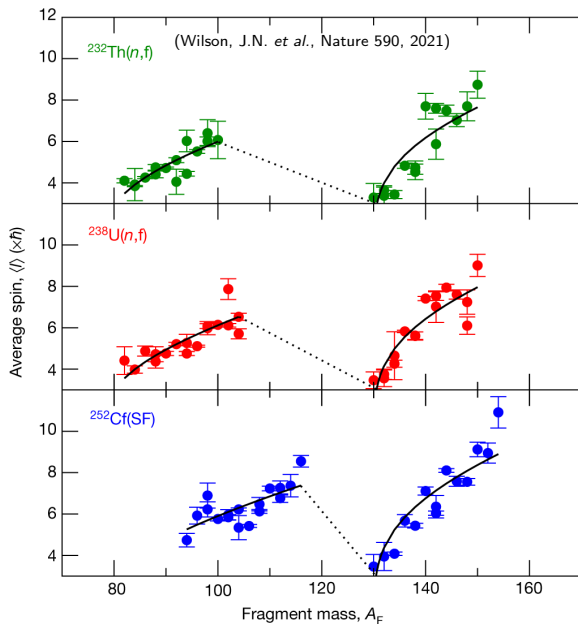
- ▶ maksimum za TFF1 oko $5\hbar$, za LFF1 pomaknut prema većim J_F
- ▶ gotovo simetrične fragmentacije jako deformirane i slične raspodjele
- ▶ TFF3 asimetrične fragmentacije nosi značajan angularni moment, dok je LFF3 sličniji LFF1

Srednja vrijednost angularnog momenta

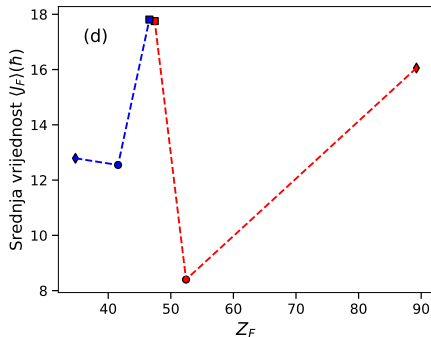
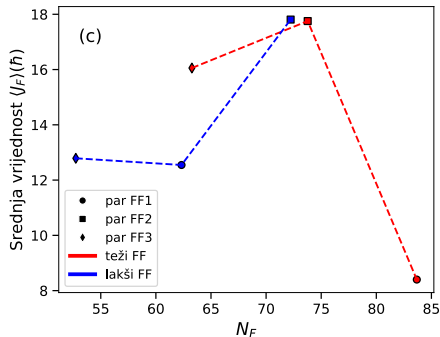


- ▶ srednja vrijednost angularnog momenta raste s deformacijom fragmenta
- ▶ nedavna mjerenja pokazala da ovisnost srednjeg angularnog momenta o masi prati uzorak zuba pile → dobiveno i u ovom slučaju

Srednja vrijednost angularnog momenta

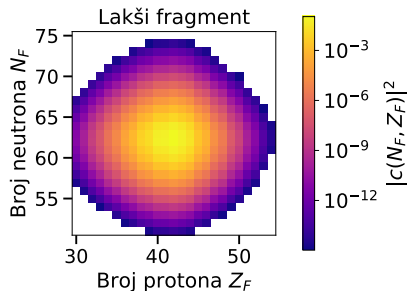
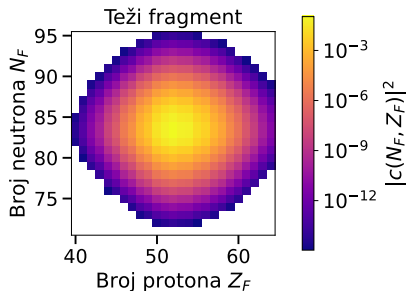


Srednja vrijednost angularnog momenta



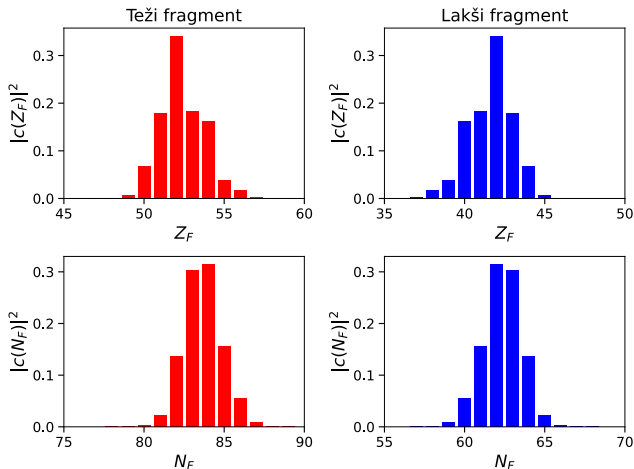
- minimum srednje vrijednosti nalazi se u blizini magičnih brojeva $Z = 50$ i $N = 82$

Dvostruka raspodjela broja nukleona



- ▶ raspodjele dobivene za konfiguraciju FF1
- ▶ HFB konfiguracija nije svojstveno stanje operatora broja čestica pa se fragmenti sastoje od linearne kombinacije komponenti sa svim brojevima čestica

Zasebne raspodjele broja nukleona



- maksimum raspodjele ($Z_T = 52$, $Z_L = 42$, $N_T = 84$, $N_L = 62$) odgovara broju dobivenom integracijom gustoće

4. Zaključak

Zaključak i mogućnost nastavka istraživanja

- ▶ srednja vrijednost angularnog momenta raste s deformacijom
- ▶ ovisnost o masi pokazuje uzorak zuba pile
- ▶ minimum srednje vrijednosti angularnog momenta u blizini magičnih brojeva
- ▶ maksimumi raspodjele broja nukleona slažu se s vrijednostima dobivenim integracijom gustoće
- ▶ moguće proširiti račun na stotinjak konfiguracija
- ▶ kombinacija AMP i PNP, uz uključivanje dinamičkih efekata → raspodjele angularnog momenta za sve kombinacije broja čestica

Hvala na pažnji!