

# **Potruga za egzotičnim strukturama u jezgrama sumpora**

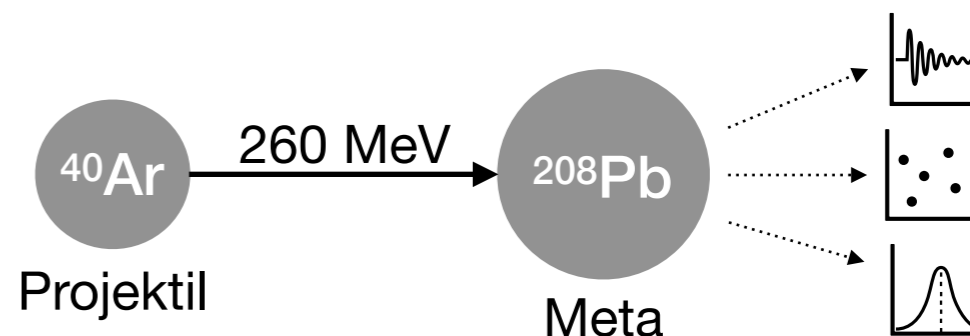
Josipa Diklič

*Mentor:* dr. sc. Tea Mijatović

*Kolegij:* Samostalni seminar iz istraživanja u fizici

# Uvod

- Tehnološkim napretkom postalo moguće sudarati i teške ione ubrzane do energija većih od kulonske barijere za reaktante → detekcija produkata reakcija poput prijenosa mnogo nukleona i duboko neelastičnih sudara
- Magnetski spektrometar PRISMA+  $\gamma$ -detektor CLARA, Nacionalni laboratorij u Legnaru (korišten za mjerenja)
- **Motivacija:** za neutronske bogate lakše jezgre poput S postoji odstupanje od standardnog modela ljusaka. Odstupanja se mogu naći i za teže jezgre, za magične brojeve  $> 28$  (teško za proizvesti daleko od doline stabilnosti).



- **Cilj:** analizom  $\gamma$ -spektara neutronske bogate jezgre 36–40S
  - potvrditi postojanje  $\gamma$ -prijelaza koji nisu uvršteni u NNDC bazu podataka, ali su već uočeni u objavljenim znanstvenim člancima
  - pronaći nove prijelaze
  - usporedba s teorijom (model ljusaka)

# Model Ijusaka

## Pretpostavka:

nezavisno gibanje  $A$  nukleona u srednjem nuklearnom potencijalu

mногоčestična valna funkcija

$$\hat{H}\Psi_A = E\Psi_A$$

$$\hat{H} = \sum_i^A \hat{h}_i + \hat{V}$$

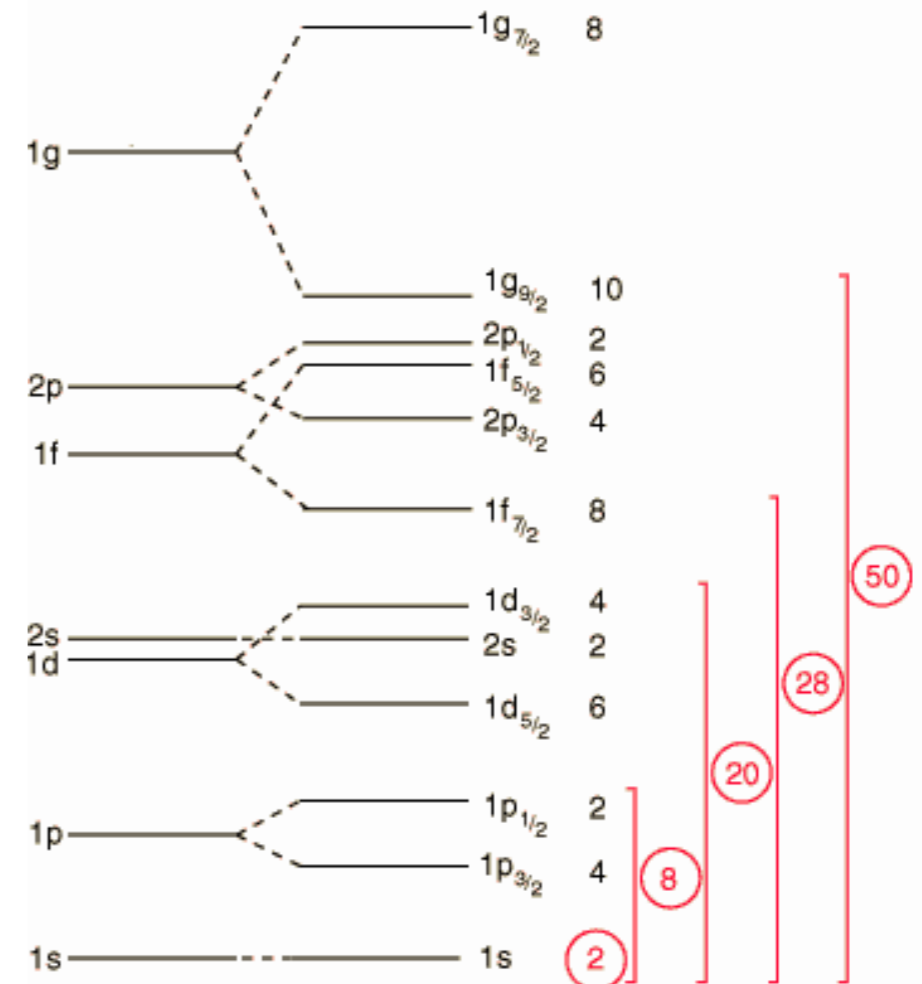
jednočestični hamiltonijan  $\nearrow$   $\hat{h}_i$       mnogočestična interakcija (smetanja)  $\nearrow$   $\hat{V}$

$$\hat{h}_i = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + \frac{m\omega^2 r^2}{2} + f_{ll}(r)(\vec{l} \cdot \vec{l}) + f_{ls}(r)(\vec{l} \cdot \vec{s})$$

masa nukleona =  $m$   
 angularni moment =  $\vec{l}$   
 intrinzični spin =  $\vec{s}$

harmonički oscilator  $\underbrace{\hspace{10em}}$       centrifugalni član      spin-orbitni član  
 cijepanje nivoa h.o.  $\underbrace{\hspace{10em}}$

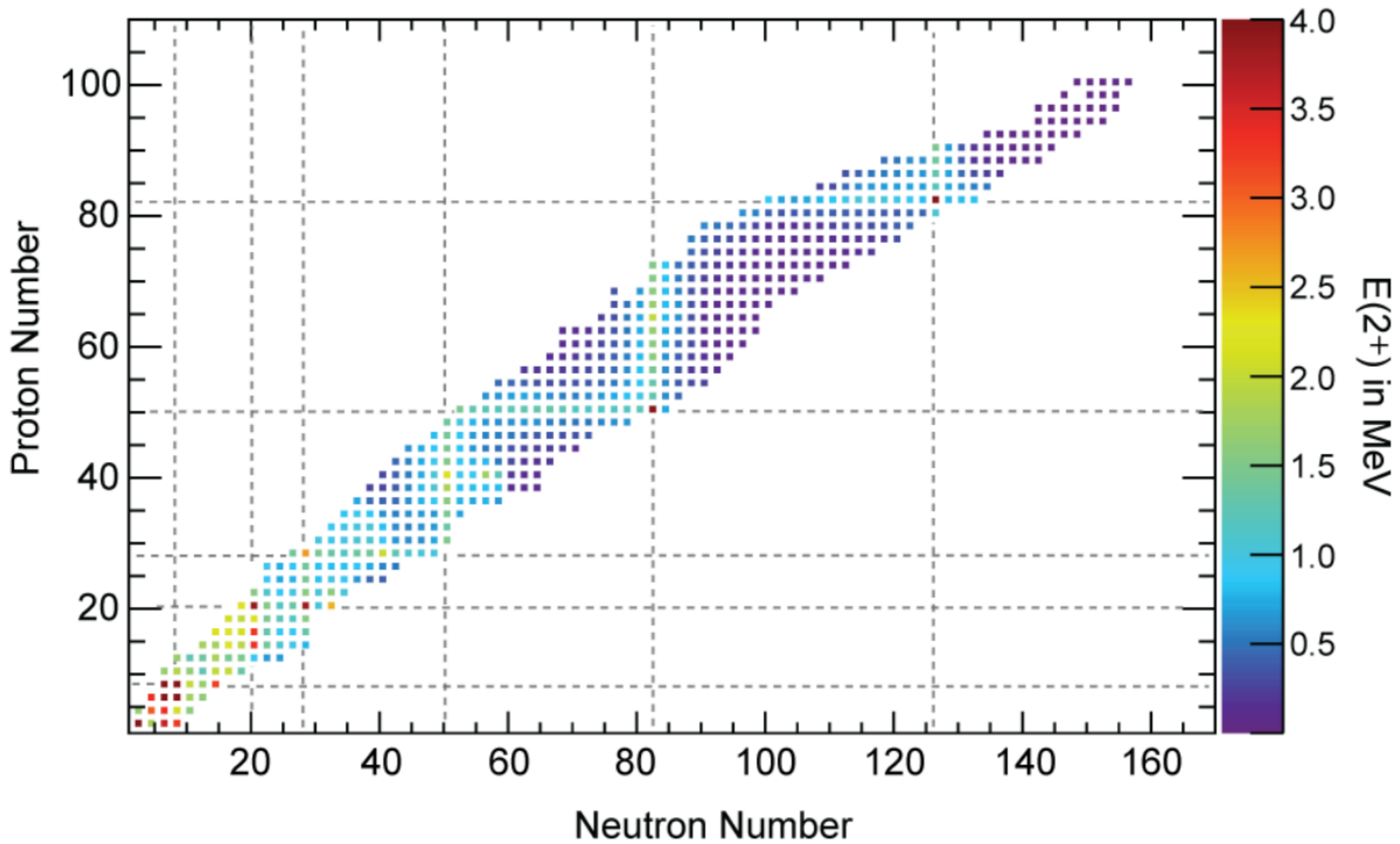
Relation between shell model and magic numbers



Dijagonalizacija smetnje (računalni algoritmi)

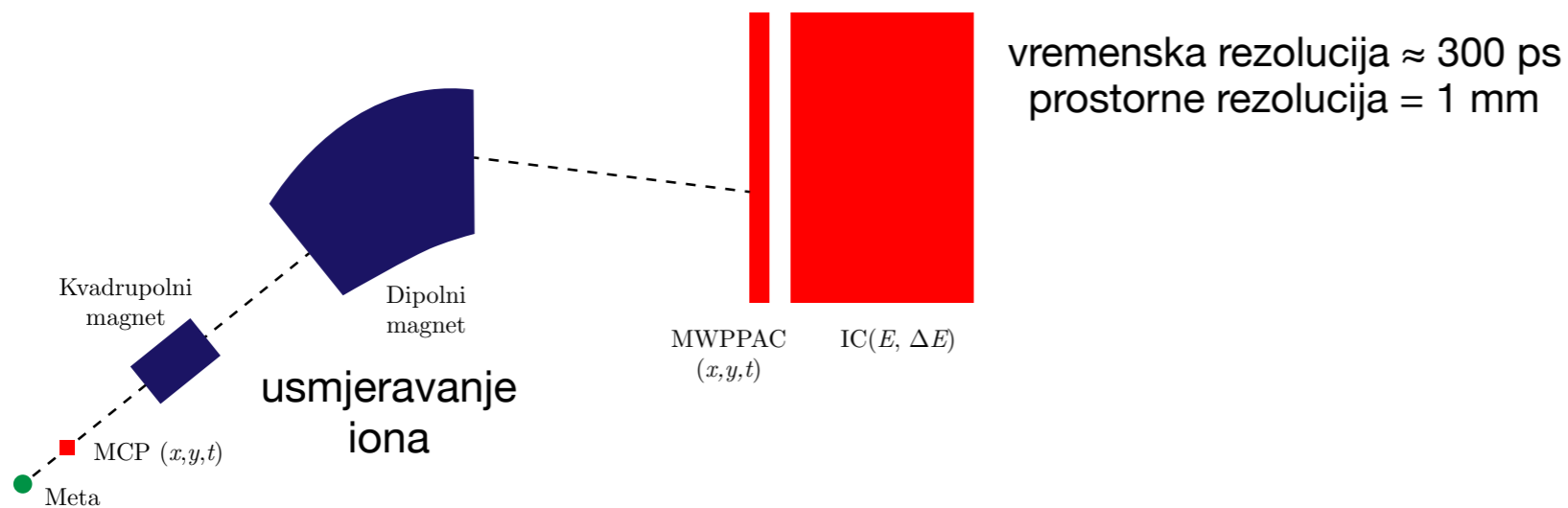
Iz jednočestičnih stanja konstruirati mnogočestična (dobro definiran spin  $J$  i izospinom  $T$ )

$$l = 0, 1, 2, 3, 4, \dots = s, p, d, f, g, \dots$$



# Eksperimentalni postav

## I. Magnetski spektrometar PRISMA

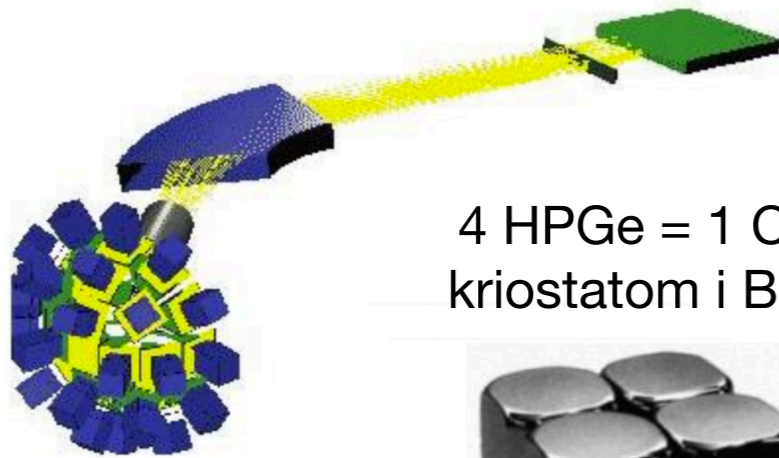


**Mjerimo:**  
položaja iona  $(x, y)$   
vremena preleta  $tof = t_{MCP} - t_{PPAC}$   
kinetičku energiju  $E$   
gubitak energije  $\Delta E$

→  
putanja iona

atomski broj  $Z$   
maseni broj  $A$   
nabojno stanje  $q$   
brzina  $v$

# II. Detektor elektromagnetskog zračenja CLARA

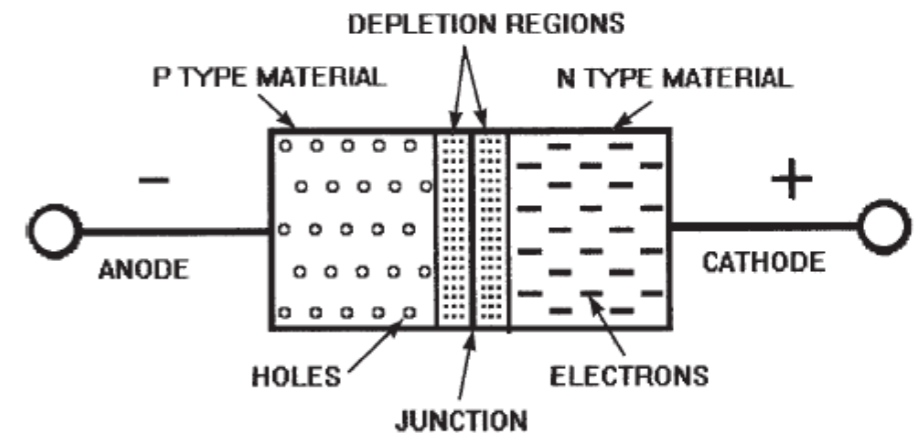
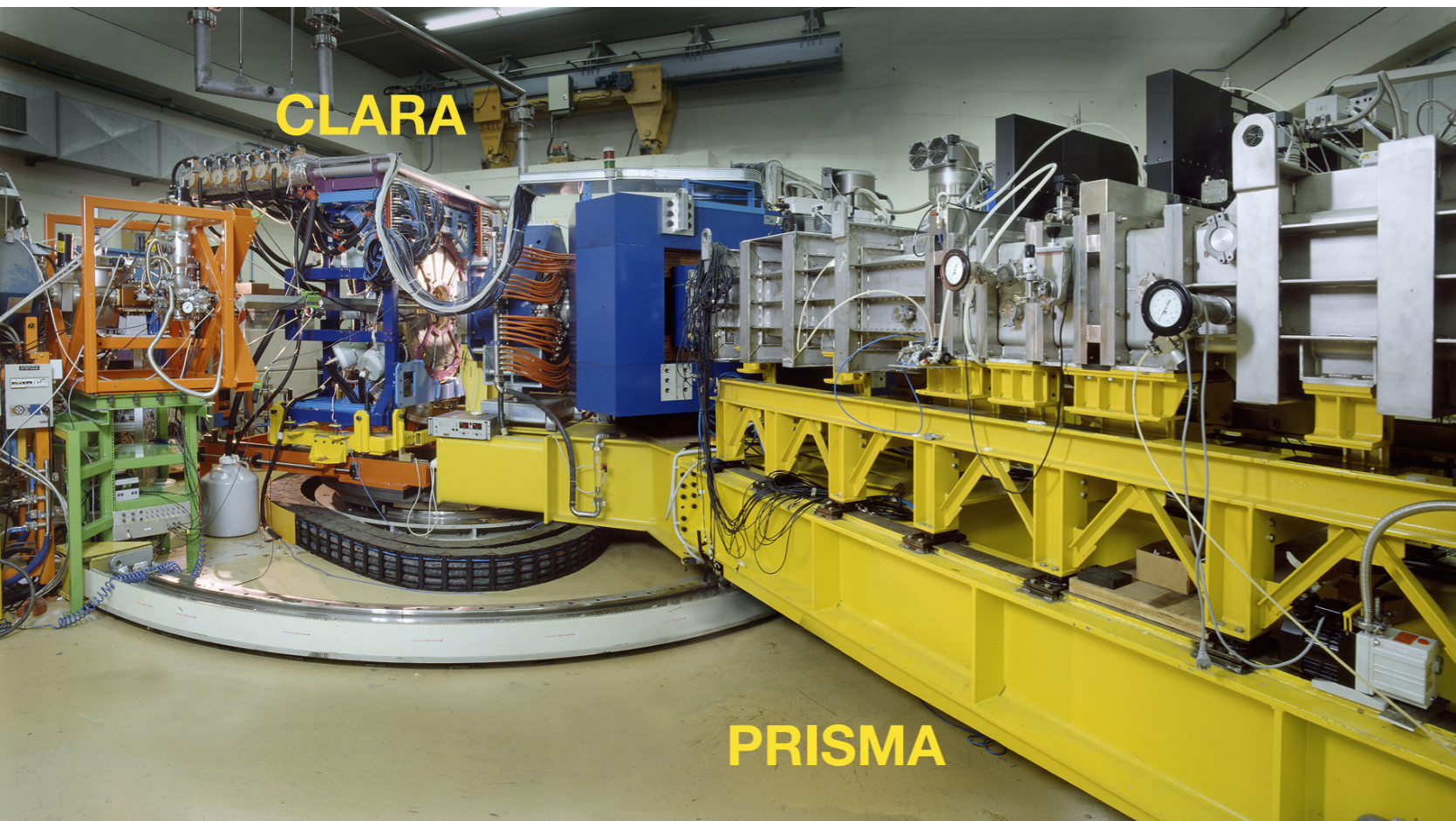


4 HPGe = 1 Clover sa zajedničkim kriostatom i BGO antikoptonskim štitom



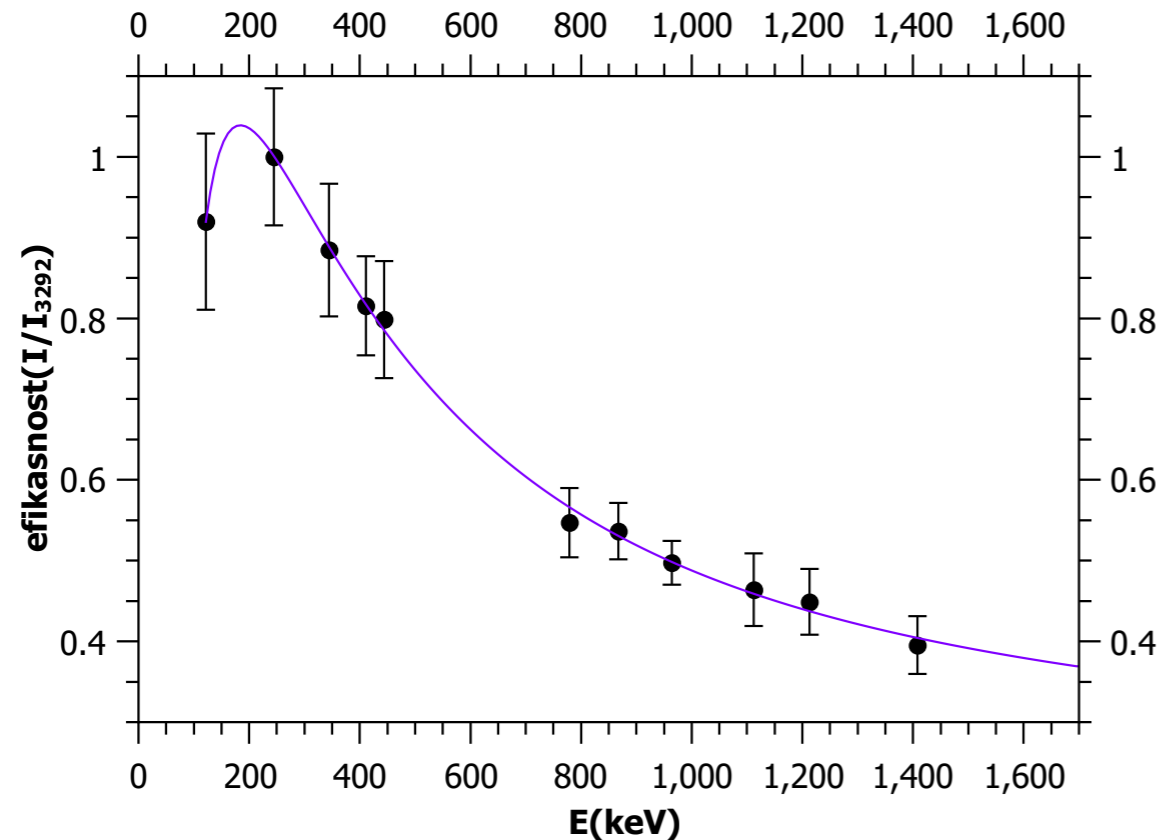
25 Clover germanijskih detektora

- Inverzno narinuti p-n spoj
- U području osiromašenja stvaranje elektron-šuljina parova → struja (signal)
- Broj parova ~ E ulaznog zračenja



Moć zaustavljanja ~  $Z$   
 $Z_{Ge} > Z_{Si}$

# III. Kalibracija efikasnosti



$$ef(E) = \sum_{i=0}^5 a_i \ln(E)^i$$

$$a_0 = (129 \pm 59)$$

$$a_1 = (89 \pm 44)$$

$$a_2 = (24 \pm 13)$$

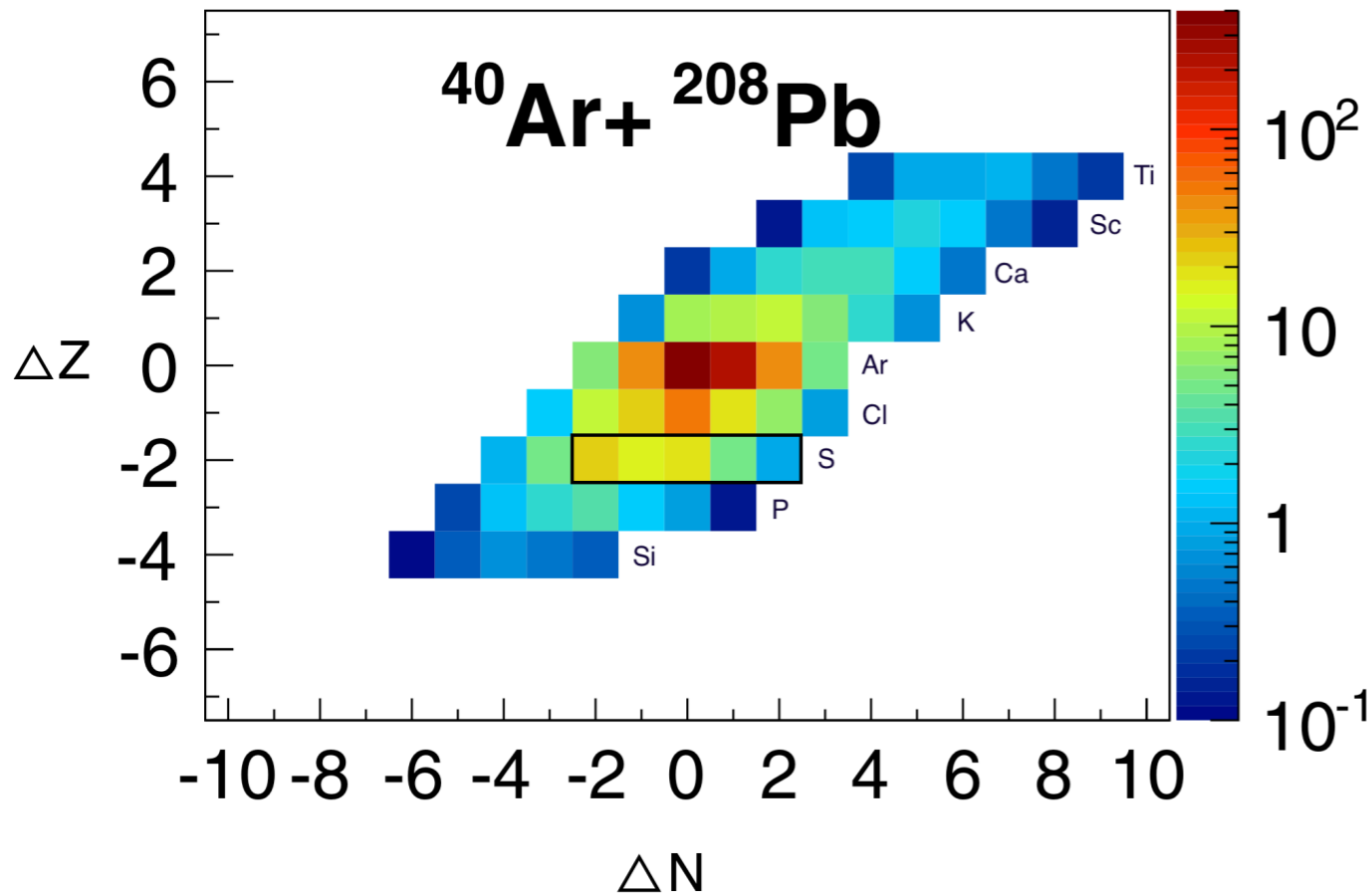
$$a_3 = (3 \pm 2)$$

$$a_4 = (0.2 \pm 0.1, )$$

$$a_5 = (0.005 \pm 0.004)$$

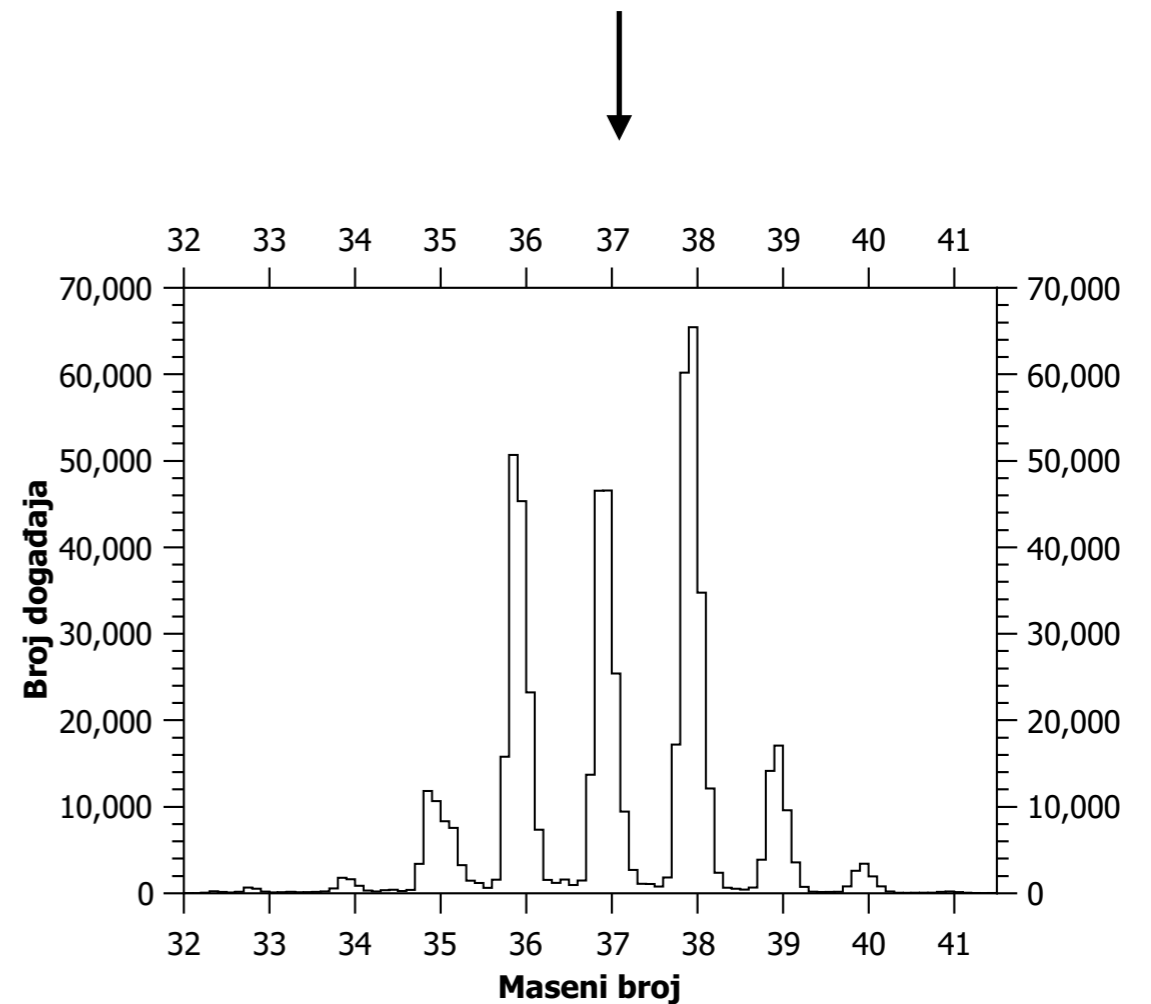
- Efikasnost = br.zabilježenih / br.emitiranih događaja
- br.događaja ~ intenzitet zračenja
- Efikasnost (E)
- Kalibracija — izvor <sup>152</sup>Eu
- Relativna efikasnost = (izmjereni / karakteristični intenzitet) + normalizacija (bitan trend)
- Smanjenje efikasnosti s povećanjem energije

# Rezultati



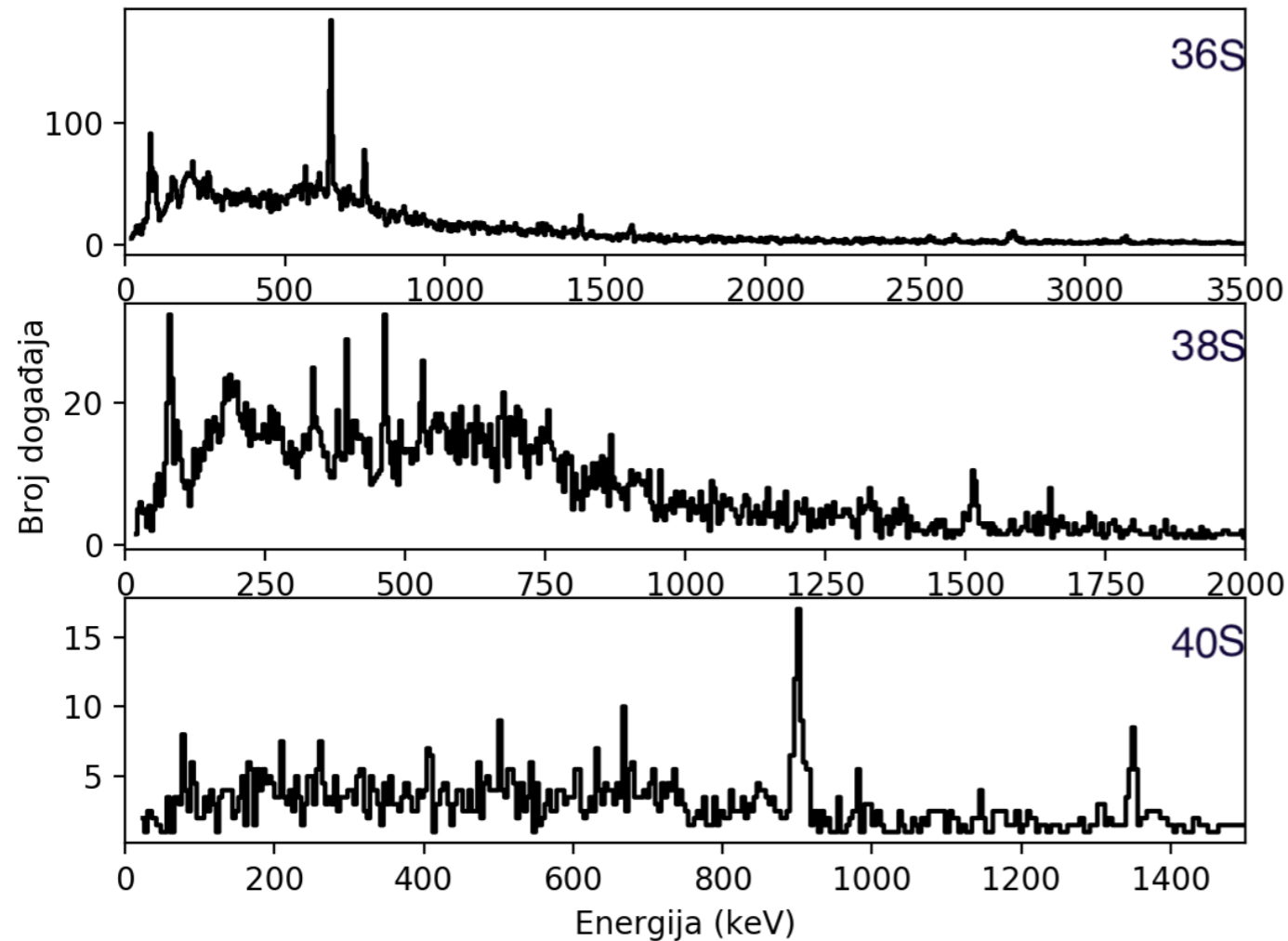
Broj događaja za izlazne kanale sumpora  
—> malo statistike za  $^{40}\text{S}$  —> veća  
neodređenost u energiji i intenzitetu  $\gamma$ -zrake

→ Udarni presjeci za sve izlazne kanale  
Odabiremo sumpor





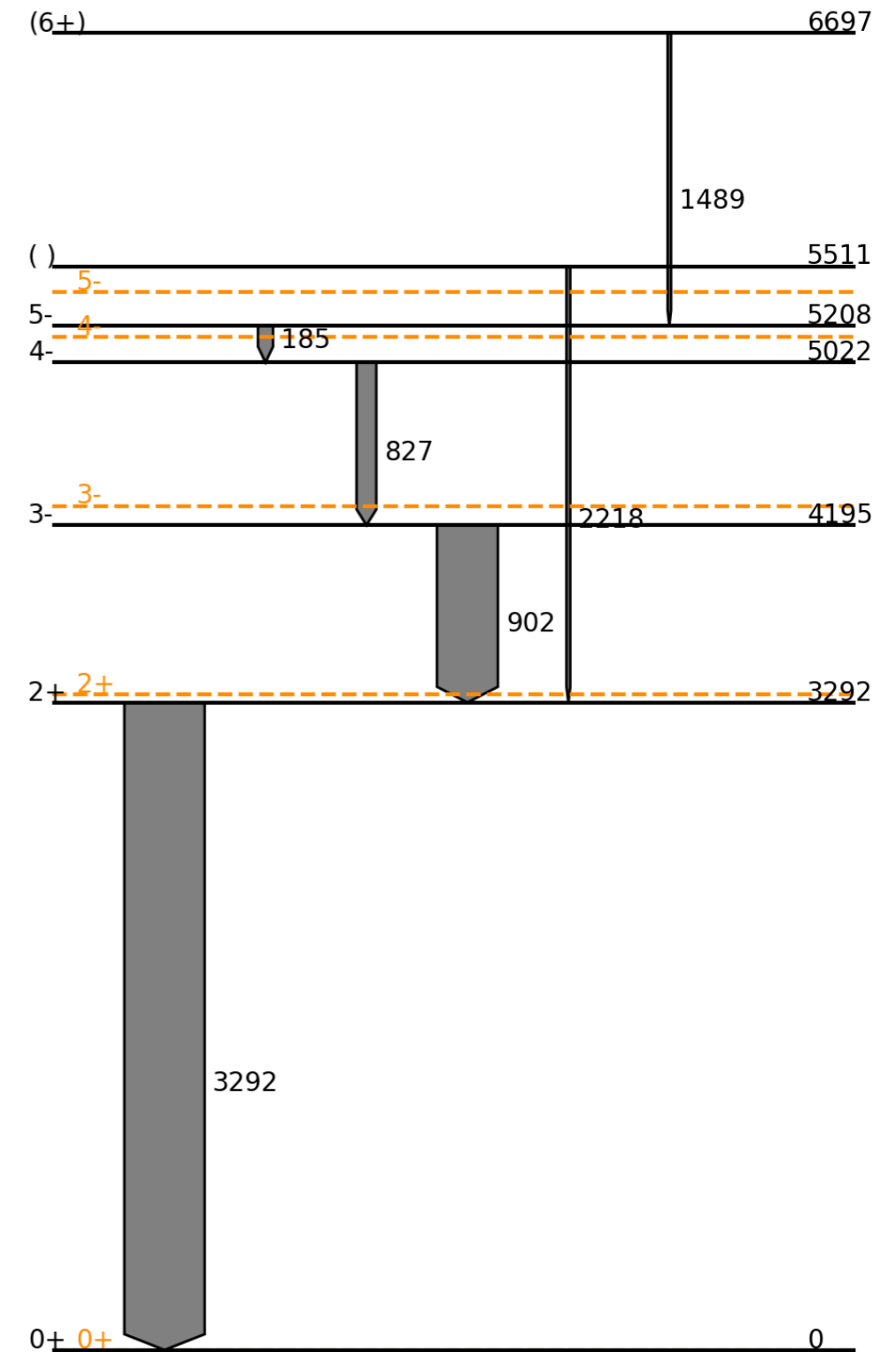
# I. Parne jezgre



- Energetski spektri parnih jezgri, za energetski interval bitan za razmatranje
- Potrebno uzeti u obzir efikasnost detektora
- Uočavanje vrhova  $\rightarrow$  Gaussian fit  $\rightarrow$  položaj (E), širina (FWHM), površina (A)  $\rightarrow$  intenzitet (A/FWHM) + normalizacija

# I.1. Jezgra $^{36}\text{S}$

$E(\text{keV})$ ( $\Delta_E$ )	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta_I)$	FWHM	$J_i \rightarrow J_f$
185.5 (0.2)	184.6	0.19 (0.09)	3.95	$5^- \rightarrow 4^-$
827.5 (0.2)	828.8	0.25 (0.09)	4.77	$4^- \rightarrow 3^-$
902.4 (0.3)	901.5 (4)	0.76 (0.22)	9.41	$3^- \rightarrow 2^+$
1489.5 (0.2)	1485	0.04 (0.02)	2.93	$(6^+) \rightarrow (5^-)$
2218.6 (0.5)	2217.7 (3)	0.05 (0.07)	2.85	$(2, 4) \rightarrow 2^+$
3292.1 (0.7)	3290.8 (0.6)	1 (0.23)	23.78	$2^+ \rightarrow 0^+$

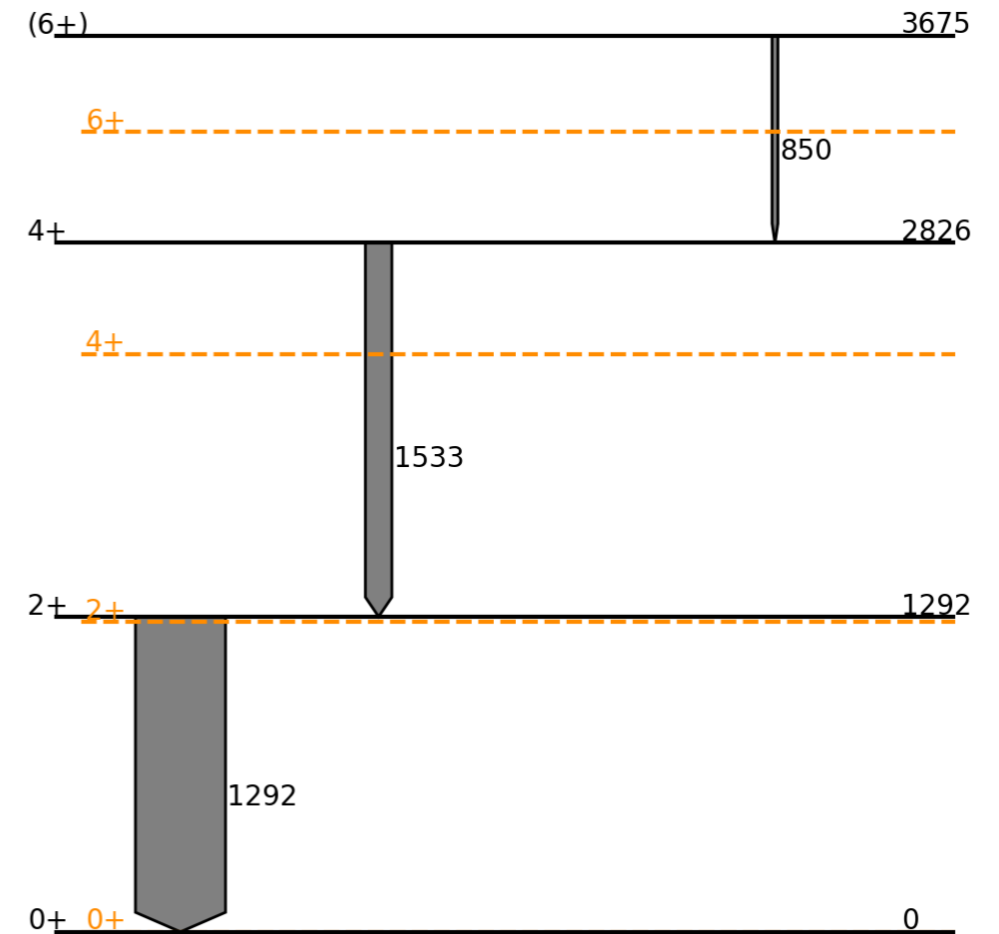


- Magičan broj neutrona (20)
- Svi prijelazi već upisani u bazu podataka NNDC
- Nisko odstupanje od tabličnih vrijednosti
- Model ljusaka dobro predviđa energetske nivoe, ali bolje se podudara s eksperimentom na nižim energijama

## I.2. Jezgra $^{38}\text{S}$

$E(\text{keV})$ ( $\Delta_E$ )	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta_I)$	FWHM	$J_i \rightarrow J_f$
383.6 (0.6)	383 <sup>[5]</sup>	0.04 (0.24)	1.64	
850.0 (0.6)	849 <sup>[5]</sup>	0.06 (0.04)	7.51	$(6^+) \rightarrow 4^+$
1292.2 (0.3)	1292.0 (0.2)	1 (0.19)	12.57	$2^+ \rightarrow 0^+$
1533.8 (0.5)	1533.2 (1)	0.29 (0.1)	12.77	$4^+ \rightarrow 2^+$

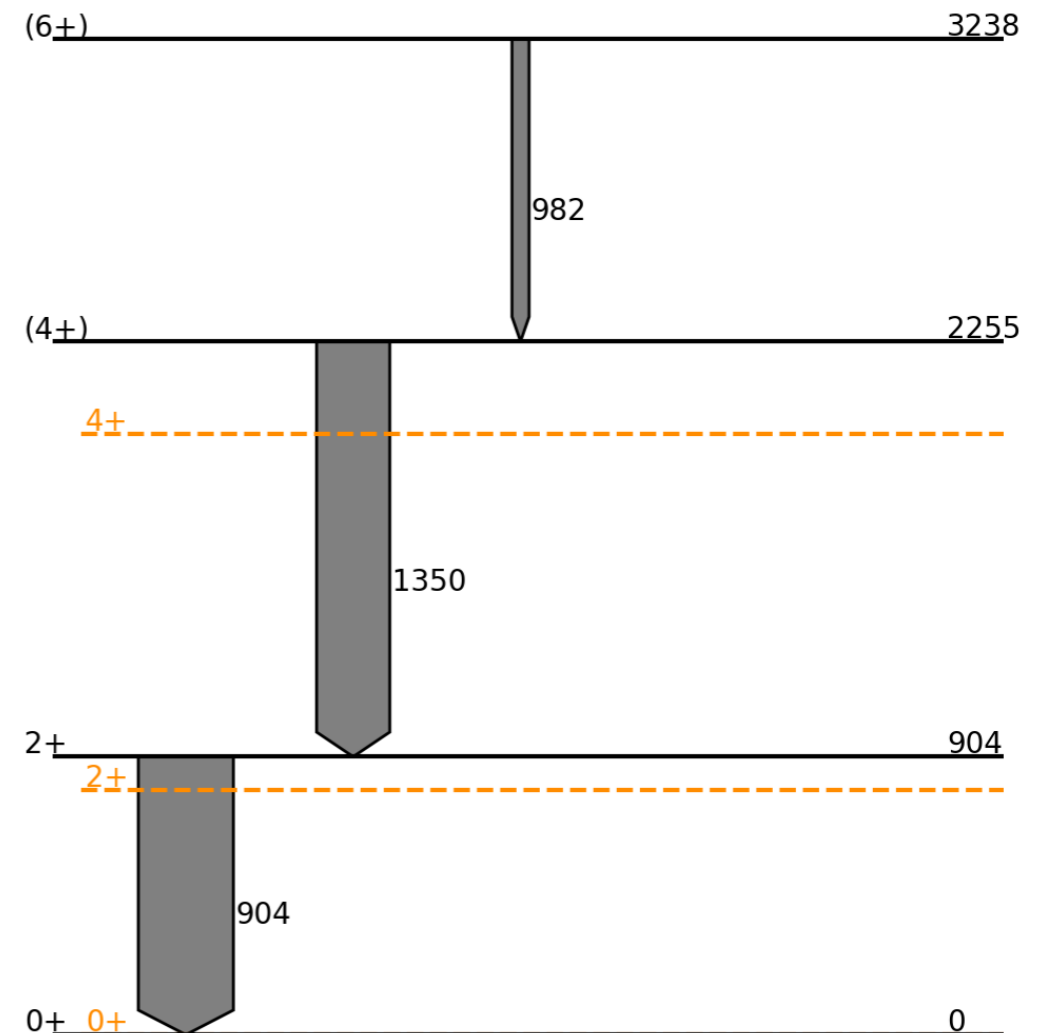
- Energije na 383 i 850 keV nisu u bazi podataka, ali su uočene u znanstvenim člancima (potvrda postojanja)
- Pobuđivanje yrast stanja (najniže stanje za dani angularni moment)  $2^+, 4^+, 6^+$  koja se dominantno pobuđuju u reakcijama prijenosa mnogo nukleona
- Porastom energije pobuđenja odstupanja između eksperimenta i teorije postaju sve veća

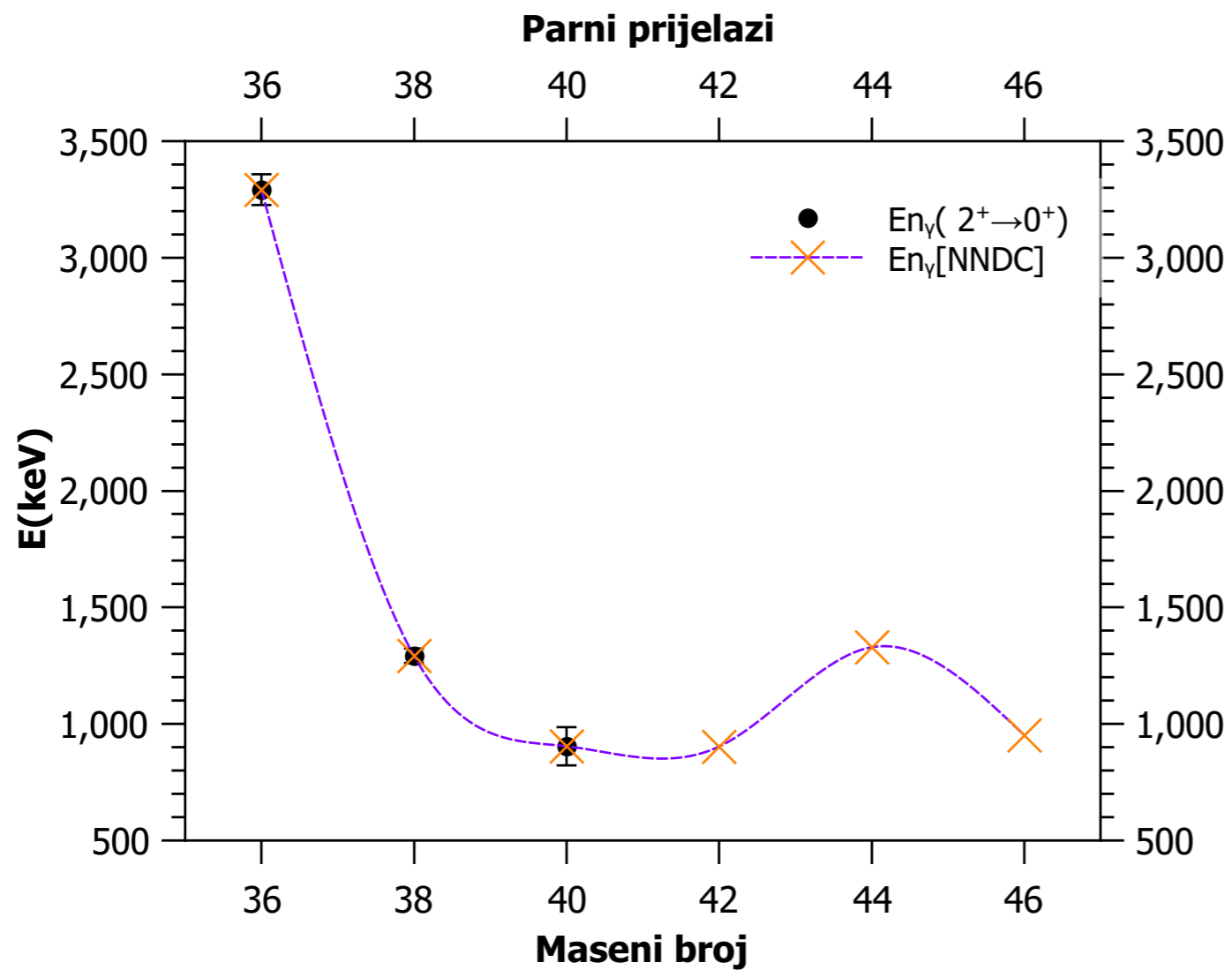


# I.3. Jezgra $^{40}\text{S}$

$E(\text{keV}) (\Delta_E)$	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta_I)$	FWHM	$J_i \rightarrow J_f$
409.7 (0.4)		0.18 (0.1)	4.45	
669.7 (0.4)		0.18 (0.16)	2.80	
904.2 (0.8)	903.7 (0.9)	1 (0.58)	8.99	$2^+ \rightarrow 0^+$
983.0 (0.3)	981.2 (0.4)	0.18 (0.12)	3.13	$(6^+) \rightarrow (4^+)$
1350.8 (0.8)	1351.1 (0.1)	0.77 (0.35)	12.04	$(4^+) \rightarrow 2^+$

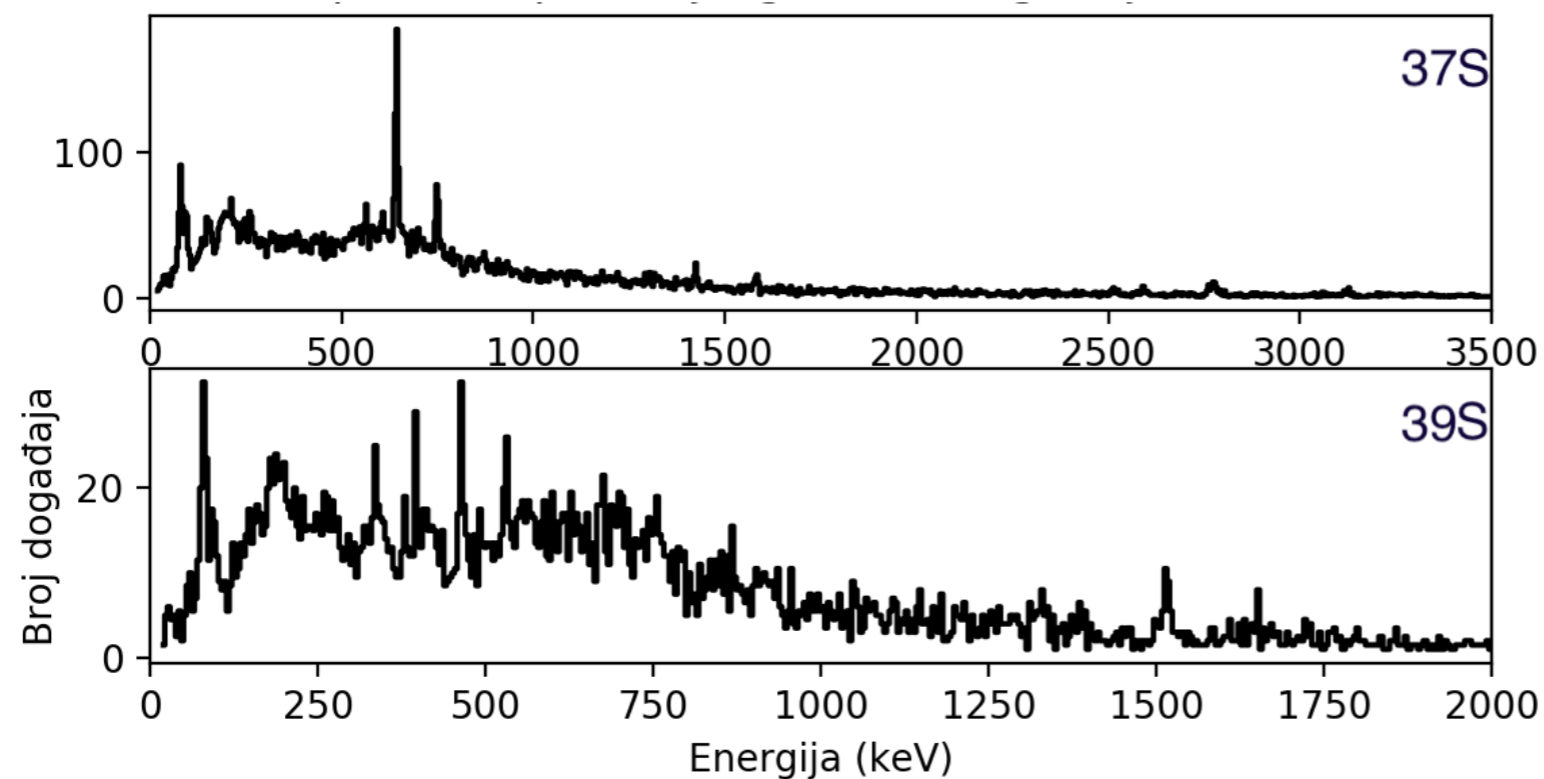
- Vrhovi na 410 i 670 do sad neuočeni (intenzitet 18%)
- Model ljusaka dobro predviđa  $2^+$  stanje,  $4^+$  za 200 keV niže





- Magičan broj neutrona (20,28) za masene brojeve 36 i 44
- Križići - baza podataka NNDC
- Krivulja prikaz trenda
- Energija prvog pobuđenog stanja najniža između magičnih brojeve
- Jezgra masenog broja 44 odstupa

## II. Neparne jezgre

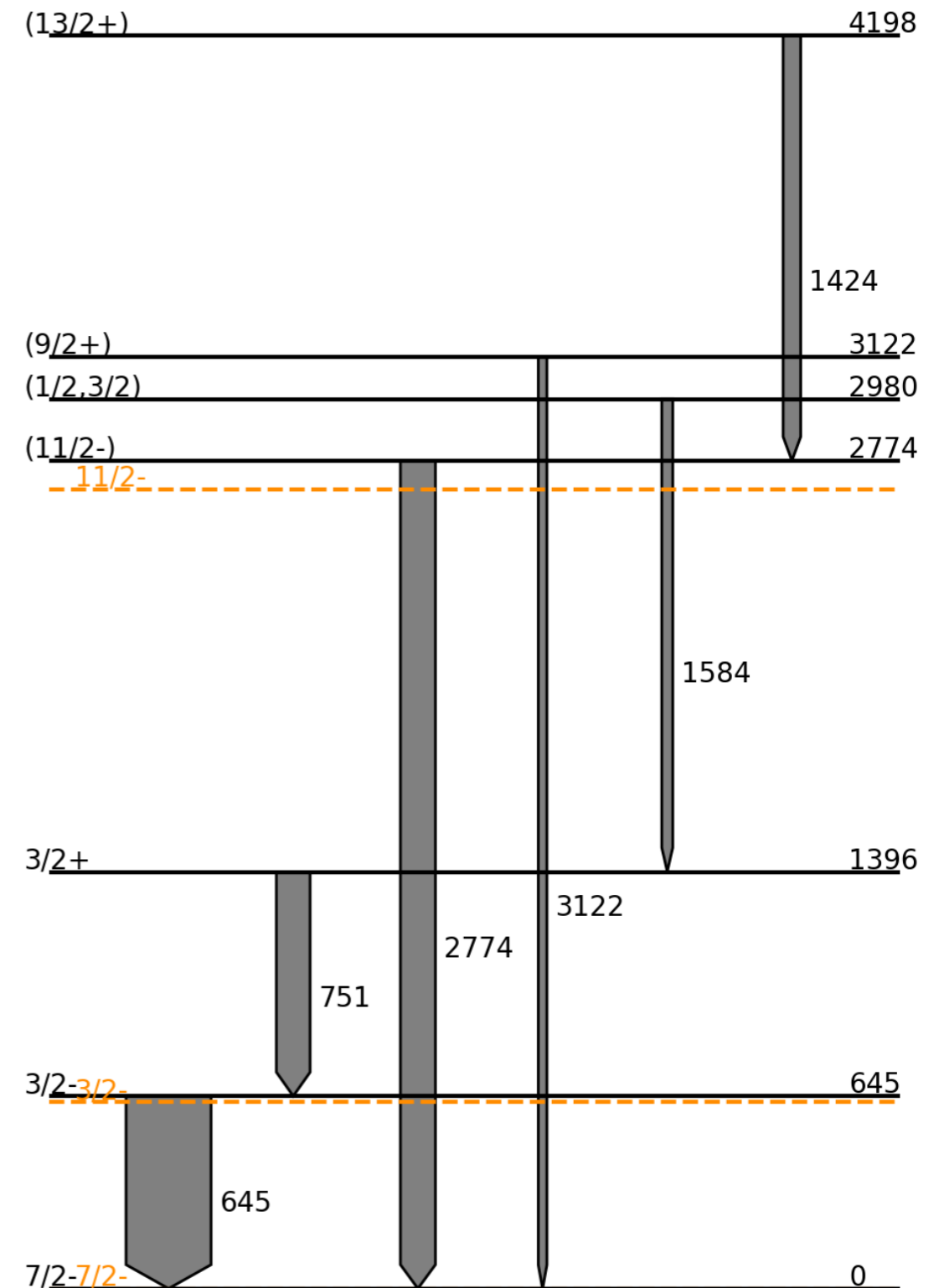


- Energetski spektri neparnih jezgri, za energetski interval bitan za razmatranje
- Potrebno uzeti u obzir efikasnost detektora
- Uočavanje vrhova  $\rightarrow$  Gaussian fit  $\rightarrow$  položaj (E), širina (FWHM), površina (A)  $\rightarrow$  intenzitet (A/FWHM) + normalizacija

## II.1. Jezgra $^{37}\text{S}$

$E(\text{keV})$ ( $\Delta_E$ )	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta_I)$	FWHM	$J_i \rightarrow J_f$
645.2 (0.2)	646.17 (0.01)	1.0(0.1)	8.0	$\frac{3}{2}^- \rightarrow \frac{7}{2}^-$
751.1 (0.3)	751.3 (0.2)	0.4 (0.06)	8.5	$\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{3}{2}^-$
1424 (1)	1420(1) <sup>[3]</sup>	0.2 (0.1)	12.9	$(\frac{13}{2}^+) \rightarrow (\frac{11}{2}^-)$
1584 (1)	1583 <sup>[6]</sup>	0.13 (0.08)	8.65	$(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}) \rightarrow (\frac{3}{2}^+)$
2774 (1)	2776(2) <sup>[3]</sup>	0.41 (0.09)	27.5	$(\frac{11}{2}^-) \rightarrow (\frac{7}{2}^-)$
3123 (3)	3120(2) <sup>[3]</sup>	0.10 (0.07)	17.9	$(\frac{9}{2}^+) \rightarrow (\frac{7}{2}^-)$

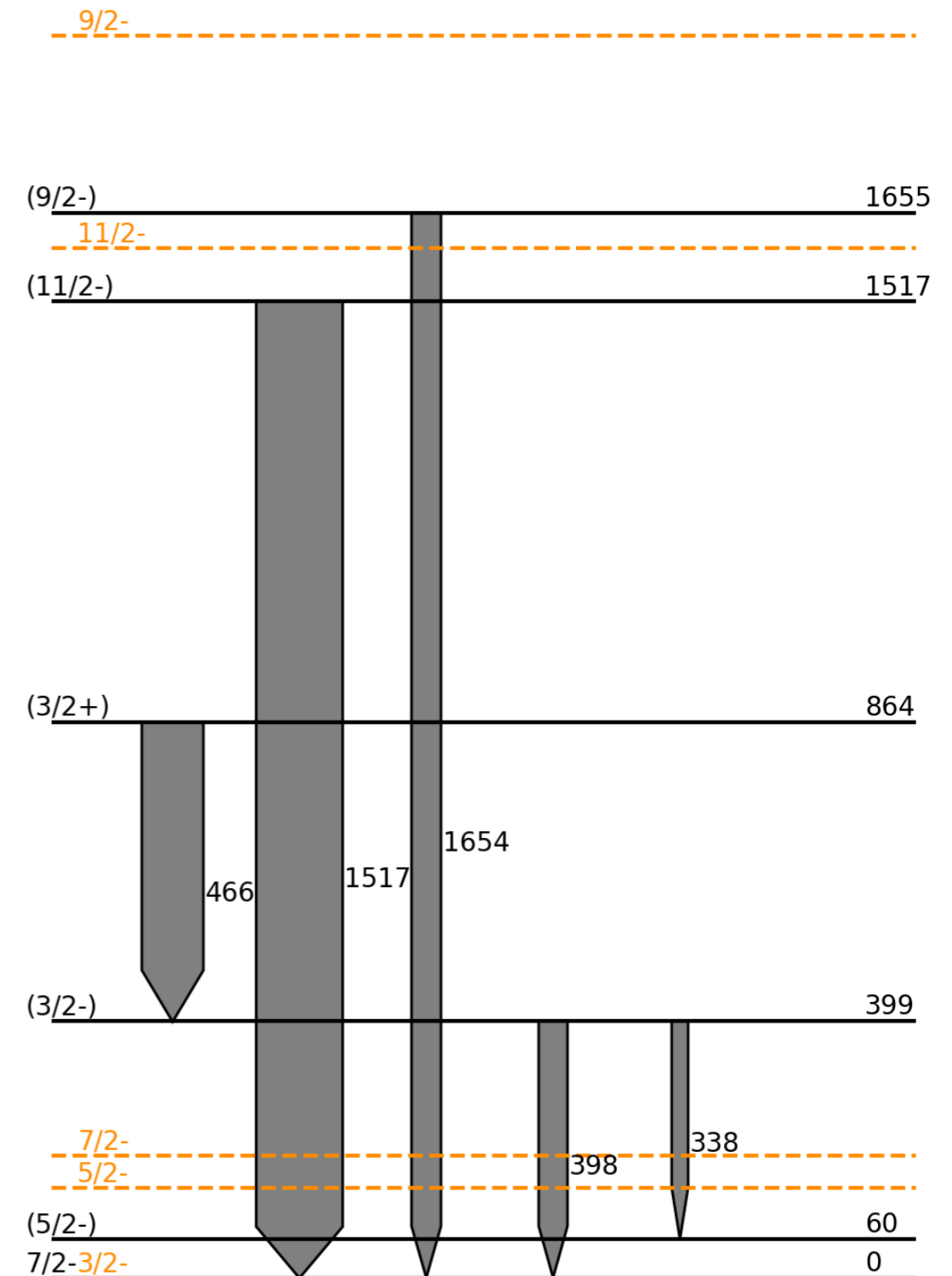
- Samo dvije energije prijelaza koje smo opazili upisane su u bazu podataka NNDC
- Ostale su već detektirane i prethodno objavljene u znanstvenim člancima.
- Vrh 1584 keV prethodno je izmjereno, ali nije određen spin i paritet prijelaza. U članku je prikazana shema energetskih nivoa gdje je upisan energetski nivo na 2978 keV (odgovara početnom nivou za taj  $\gamma$ -prijelaz).
- Stanja pozitivnog pariteta — uljezna stanja ili intruder stanja (nisu izračunata takva stanja prema modelu ljusaka)
- Jako pobudeno stanje može se opisati kao vezanje nesporenog neutrona u jezgri  $^{37}\text{S}$  na fonon  $2^+$  stanja u jezgri  $^{36}\text{S}$



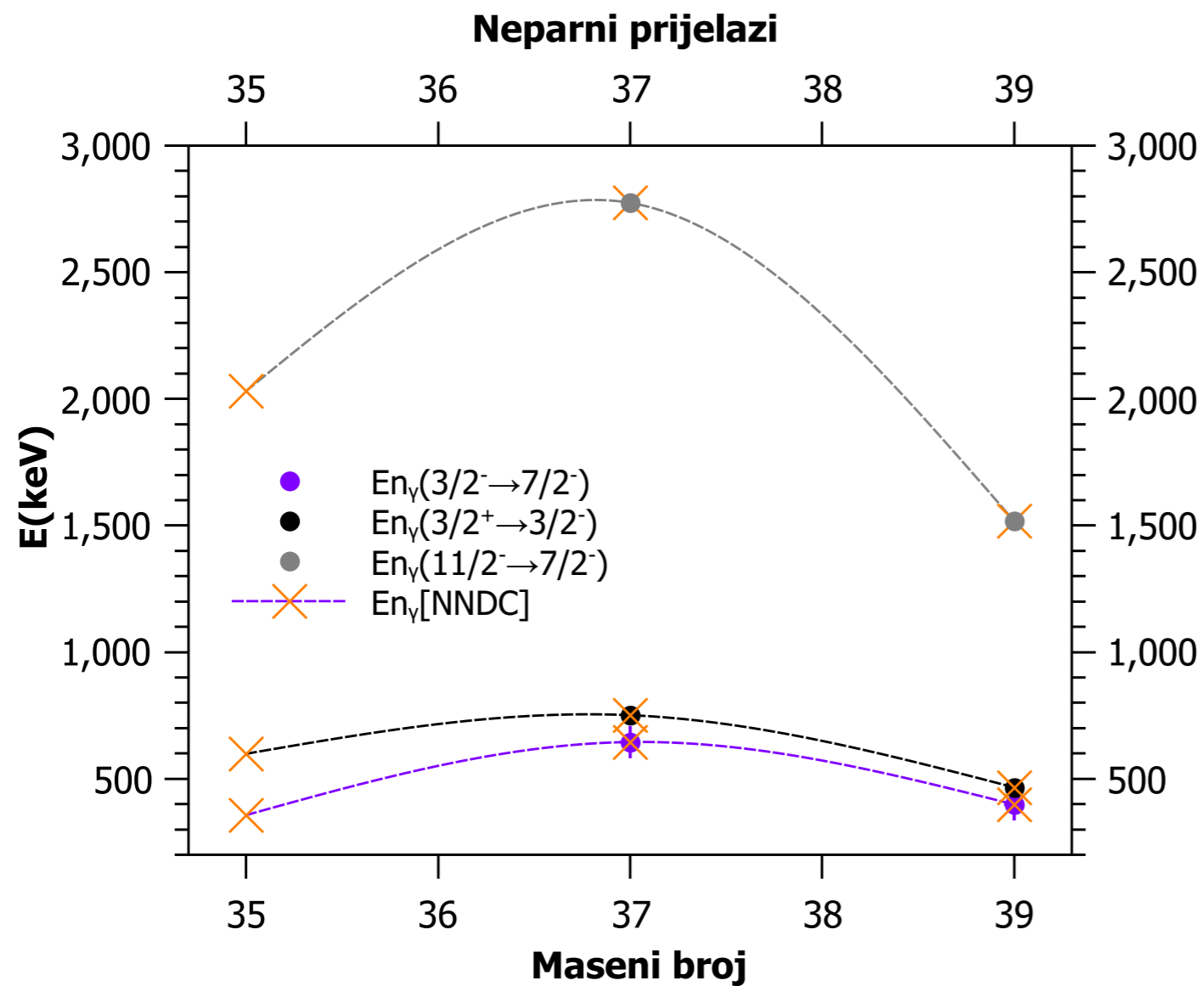
## II.2. Jezgra $^{39}\text{S}$

$E(\text{keV})$ ( $\Delta_E$ )	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta_I)$	FWHM	$J_i \rightarrow J_f$
338.6 (0.9)	339(1) <sup>[4]</sup>	0.2 (0.2)	4.2	$(\frac{3}{2}^-) \rightarrow (\frac{5}{2}^-)$
398.6 (0.5)	398.6 (0.1)	0.3 (0.3)	3.3	$\frac{3}{2}^- \rightarrow \frac{7}{2}^-$
466.0 (0.5)	465.5 (0.2)	0.7 (0.4)	6.5	$\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{3}{2}^-$
533.4 (0.3)	533(4) <sup>[9]</sup>	0.5 (0.1)	6.3	
1517.3 (0.9)	1517 (1)	1 (0.4)	12.9	$\frac{11}{2}^- \rightarrow \frac{7}{2}^-$
1654.5 (0.3)	1656 (1)	0.3(0.1)	1.4	$\frac{9}{2}^- \rightarrow \frac{7}{2}^-$

- Potvrđene dvije energije prijelaza koje nisu u bazi podataka
- Uljezna stanja (pozitivan paritet) visokog intenziteta
- Ni u najnižim pobuđenim energetske nivoima teorija ne opisuje eksperiment
- Predviđa i drugačiji raspored samih nivoa










- Jezgra s masenim brojem 37 najbliža magičnom broju neutrona
- Križići - baza podataka NNDC
- Krivulja prikaz trenda
- Očekivani trend da jezgre s brojem neutrona najbliže magičnom broju imaju najveću energiju  $\gamma$ - zrake za određeni prijelaz

# Zaključak

Cilj: iz podataka koje smo dobili reakcijom sudara mete  $^{208}\text{Pb}$  i projektila  $^{40}\text{Ar}$  proučiti spektre neutronske bogatih jezgara sumpora te pronaći:

- neotkrivene prijelaze  $\rightarrow$   (za jezgru  $^{40}\text{S}$  na 409.7 i 669.7 keV)
- nepotvrđene prijelaze  $\rightarrow$  
- usporebu s modelom ljusaka  $\rightarrow$  

Primjetili smo:

- Neslaganje s modelom ljusaka na višim energetske nivoima
- Pojava yrast stanja
- U neparnim jezgrama izmijernili smo jaka pobuđena stanja jednočestičnog karaktera te pobuđena stanja koja se mogu objasniti vezanjem nesporenog neutrona na  $2^+$  stanja pripadajućih parno-parnih jezgri ( $11/2^-$ )

Istraživanje bitno za opisivanje svojstava jezgre i nadopunjavanje te korekcije sadašnjih teorijskih modela

# Literatura

- <sup>1</sup> NNDC. Karta nuklida. Brookhaven National Laboratories. <http://www.nndc.bnl.gov/>
- <sup>2</sup> Clover konfiguracija. LNL INFN. <http://www.lnl.infn.it/~prisma/claratechnical/node3.html>
- <sup>3</sup> Chapman, R., Wang, Z. M., Bouhelal, M., Haas, F., Liang, X., Azaiez, F., ... Curien, D. (2016). Particle-core coupling in S 37. *Physical Review C*, 93(4), 044318.
- <sup>4</sup> Chapman, R., Wang, Z. M., Bouhelal, M., Haas, F., Liang, X., Azaiez, F., ... Curien, D. (2016). First in-beam  $\gamma$ -ray study of the level structure of neutron-rich S 39. *Physical Review C*, 94(2), 024325.
- <sup>5</sup> Wang, Z. M., Chapman, R., Liang, X., Haas, F., Azaiez, F., Behera, B. R., ... Deacon, A. N. (2010).  $\gamma$ -ray spectroscopy of neutron-rich S 40. *Physical Review C*, 81(5), 054305.
- <sup>6</sup> Wang, K. L., Wang, J. G., Zhou, X. H., Liu, M. L., Qiang, Y. H., Guo, S., ... Zheng, Y. (2016). Lifetime measurement of the first excited state in S 37. *Physical Review C*, 94(4), 044316
- <sup>7</sup> Mijatović, T., Szilner, S., Corradi, L., Montanari, D., Polarolo, G., Fioretto, E., ... Milin, M. (2016). Multinucleon transfer reactions in the Ar 40+ Pb 208 system. *Physical Review C*, 94(6), 064616.
- <sup>8</sup> Mijatovic, T. (2015). Study of heavy-ion reactions with large solid angle magnetic spectrometers (Doctoral dissertation, FACULTY OF SCIENCE, University of Zagreb).
- <sup>9</sup> Lunderberg, E., Gade, A., Bader, V., Baugher, T., Bazin, D., Berryman, J. S., ... Weisshaar, D. (2016). In-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy of S 38–42. *Physical Review C*, 94(6), 064327.
- <sup>10</sup> Deša Jelavić Malenica (2013) Seminar iz Teorije strukture atomske jezgre 1: Kompletni račun modela ljasaka za  $^{36}\text{S}$ . Institut Ruder Bošković, ZEF, LNF