

Potruga za egzotičnim strukturama u jezgrama sumpora

Josipa Diklić*

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

Mentor: dr.sc.Tea Mijatović
*Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku,
Laboratorij za nuklearnu fiziku,
Bijenička cesta 54, Zagreb*

(Dated: 20. siječnja 2019.)

U sudaru mete ^{208}Pb i projektila ^{40}Ar nastaju razni izlazni kanali. U ovom seminaru identificirali smo karakteristične elektromagnetske prijelaze za jezgre sumpora masenog broja 36-40, mjerene magnetskim spektrometrom PRISMA u koincidenciji s detektorom γ -zračenja CLARA, koji nastaju takvom reakcijom. Grafički je prikazana usporedba s energetskim nivoima koji su dobiveni modelom ljustaka.

I. UVOD

Saznanja koja imamo o strukturi i svojstvima jezgara uvelike dugujemo nuklearnim reakcijama. S vremenom je tehnološkim napretkom postalo moguće sudarati i teške ione ubrzane do energija većih od kulonske barijere za reaktante. Takavi sudari proizvode raznolik spektar reakcija. U prošlom desetljeću dolazi do stvaranja tehnološki naprednih eksperimentalnih postava za detekciju produkata reakcija poput prijenosa mnogo nukleona i duboko neelastičnih sudara. Primjer je PRISMA+CLARA postav, Nacionalnog laboratorija u Legnaru, koji koristimo u našem mjerenju. Magnetskim spektrometrom velikog prostornog kuta PRISMA, detektiramo i identificiramo lake produkte reakcije. Gama detektorom CLARA mjerimo elektromagnetsko zračenje u koincidenciji s lakim produktima reakcije koje detektiramo u PRISMA-i.

Jezgre koje posjeduju broj nukleona u blizini magičnog broja najbolji su kandidati za proučavanje jednočestičnog spektra pobuđenja te vezanja jednočestičnih i kolektivnih pobuđenja. U ovom eksperimentu ubrzavamo stabilan snop izotopa argona ^{40}Ar energije 260 MeV na olovnu metu ^{208}Pb , što je $\approx 30\%$ iznad kulonske barijere za reaktante. Kao rezultat imamo razne izlazne kanale, ali mi ćemo pobliže proučavati neutronske bogate jezgre sumpora masenog broja 36-40. Takve jezgre su nestabilne i ne postoje u prirodi (osim ^{36}S , sa zastupljenosti 0,01%), a zanimljiva su jer su novija istraživanja neutronske bogatih jezgri pokazala da poznati magični brojevi ne vrijede daleko od doline stabilnosti te se javljaju novi.

Cilj ovog seminara je analizom γ -spektara neutronske bogatih jezgri $^{36-40}\text{S}$ potvrditi postojanje γ -prijelaza koji nisu uvršteni u NNDC bazu podataka,^[1] ali su već uočeni u objavljenim znanstvenim člancima ili pronaći nove prijelaze koji bi se daljnom teorijskom analizom trebali smjestiti u shematske prikaze pobuđenih nivoa.

Dobivene rezultate usporedit ćemo s onim dobive-

nim teorijski, modelom ljustaka. Model ljustaka temelji se na pretpostavci nezavisnog gibanja nukleona u srednjem nuklearnom potencijalu. Takav potencijal posljedica je dvočestične interakcije svih parova nukleona. Ovakav koncept je temelj za izgradnju složenijeg modela međudjelujućih nukleona poput našega.

Potrebno je riješiti Schrödingerovu jednadžbu za takav sustav. Ako postoji A nukleona koji su opisani mnogočestičnom valnom funkcijom Ψ_A , Schrödingerovu jednadžbu glasi:

$$\hat{H}\Psi_A = E\Psi_A. \quad (1)$$

Hamiltonijan takvog sustava je suma jednočestičnih hamiltonijana i interakcije \hat{V} koja sadrži i mnogočestične članove, a može se promatrati kao smetnja:

$$\hat{H} = \sum_i^A \hat{h}_i + \hat{V}. \quad (2)$$

Za nukleon mase m , angularnog momenta \vec{l} i intrinzičnog spina \vec{s} pretpostavljamo da vrijedi radialni srednji potencijal harmoničkog oscilatora:

$$\hat{h}_i = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + \frac{m\omega^2 r^2}{2} + f_{ll}(r)(\vec{l} \cdot \vec{l}) + f_{ls}(r)(\vec{l} \cdot \vec{s}). \quad (3)$$

Kao rezultat dobijemo jednočestične valne funkcije i energetski spektar nivoa (ljustke) harmoničkog oscilatora, a centrifugalni $(\vec{l} \cdot \vec{l})$ i spin-orbitni $(\vec{l} \cdot \vec{s})$ član zaokružuju teoriju uvodeći dodatna cijepanja nivoa. Orbitale se označavaju slovima pa tako za različite angularne momente postoje različite oznake $l = 0, 1, 2, 3, 4, \dots = s, p, d, f, g, \dots$

Uz pretpostavku da je srednji potencijal dobro određen, \hat{V} je smetnja koju nam je preostalo dijagonalizirati u mnogočestičnoj bazi. Ideja je iz jednostavno dobivenih jednočestičnih stanja konstruirati nova, mnogočestična, s dobro definiranim spinom J i izospinom T . Takva dijagonalizacija rješava se računalnim algoritmima. Neke od računalnih rezultata pronašli smo u dostupnim znanstvenim člancima.

* josipadiklic@gmail.com

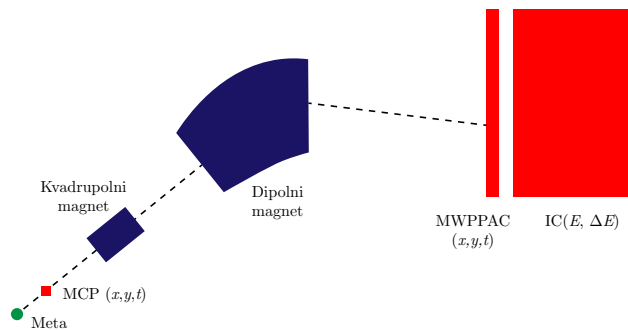
II. EKSPERIMENTALNA METODA I POSTAV

Mjerni uređaj korišten u eksperimentu je magnetski spektrometar PRISMA vezan uz γ -detektor CLARA koji se nalazi u Nacionalnom laboratoriju Legnaro, jednom od dva talijanska akceleratora centra za nuklearnu fiziku. PRISMA+CLARA uređaj omogućava identifikaciju produkata reakcije (u masi i naboju) i pripadnih γ -vrhova.

II.1. Magnetski spektrometar PRISMA

Magnetskim spektrometrom određuje se masa i naboj čestice. Identifikacija nabijenih čestica moguća je zbog osnovnih fizikalnih principa, gdje Lorentzova sila zakreće putanju čestice, a odklon određuje omjer količine gibanja p i naboja iona q .

Na slici 1 prikazana je shema magnetskog spektrometra PRISMA. Kvadrupolni i dipolni magnet služe za usmjerenje iona, dok detektori (MCP (*Micro channel plate*), MWPPAC (*Multi wire parallel plate avalanche counter*), IC (ionizacijska komora)) služe za mjerenje položaja iona (x, y) u trenutku detekcije, njihovog vremena preleta ($tof = t_{MCP} - t_{PPAC}$), kinetičke energije (E) i gubitka energije (ΔE). To omogućuje da se za produkt reakcije dobro definiraju atomski broj Z , maseni broj A , nabojno stanje q i putanja iona.



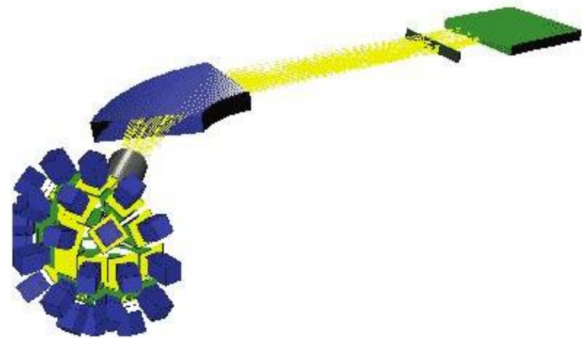
Slika 1. Slika prikazuje skicu magnetskog spektrometra PRISMA. Naznačeni su osnovni dijelovi te u zagradama fizikalne veličine koje se mjere. Crtkana linija predstavlja optičku os spektrometra.

Iako je MCP detektorski uređaj postavljen u neposrednoj blizini mete, mjerenja su moguća zbog njegove izvršne vremenske (≈ 300 ps) i prostorne (1 mm) rezolucije te visoke frekvencije bilježenja događaja.

II.2. Detektor elektromagnetskog zračenja CLARA

CLARA se sastoji od 25 Clover germanijskih detektora. HPGe kristali promjera 5 cm i duljine 7 cm grupirani su po četiri u jedan Clover detektor sa zajedničkim kriostatom i BGO antikomptonškim štitom (slika 2). 100

germanijskih kristala visoke čistoće konfigurirano je u polusferu oko mete.



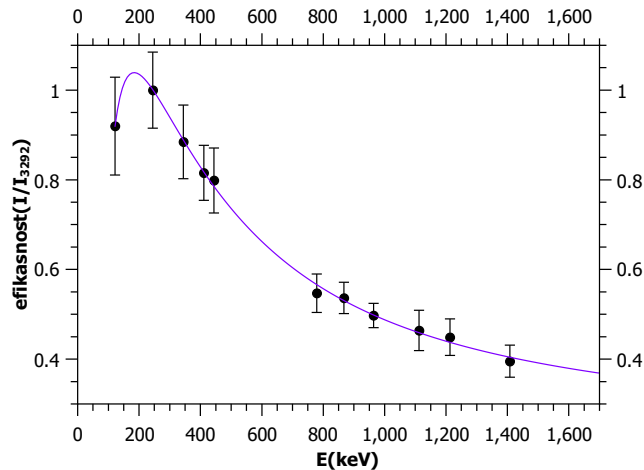
Slika 2. Shema konfiguracije CLARA detektora i PRISMA spektrometra.^[2]

Vrše se mjerenja energije i vremenskog dolaska signala, što se odvija nezavisno na svakom izlaznom kanalu te ukupne energije ostavljene štitu. Ti podatci dovoljni su da bi se reproducirao energetska spektar te radila daljnja analiza.

Osnova rada poluvodičkih detektora je inverzno narinuti n-p spoj u kojem ulogu apsorbera ima područje osiromašenja. U području osiromašenja stvarat će se elektron-šupljina par koju će detektor detektirati kao struju tj. signal. Broj nastalih elektron-šupljina parova direktno je proporcionalan energiji ulaznog zračenja. Na detektorski volumen možemo utjecati narinutim naponom V i koncentracijom poluvodičkih nečistoća N , jer se debljina apsorbera smanjuje s brojem nečistoća, a raste s povećanjem napona. Germanijski detektori operiraju s debljinom od tek par milimetara, ali HPGe sadrži manje od jedne nečistoće u 10^{12} atoma Ge pa debljinu osiromašenog područja tada mjerimo u centimetrima. Da bi spriječili nastanak termalno stvorenih parova moramo ga hladiti (optimalna radna temperatura je 77 K). Hlađenje se vrši pomoću pripadajućih Dewarovih posuda s tekućim dušikom. Ovakvi germanijski detektori jedni su od najpreciznijih detektora γ -zračenja.

II.3. Kalibracija efikasnosti

Efikasnost detektora definirana je kao omjer zabilježenih i emitiranih događaja, a broj događaja proporcionalan je intenzitetu. Ovisno o tipu detektora efikasnost može jako ovisiti o energiji. Da bi pronašli kalibracijsku krivulju koristili smo izvor ^{152}Eu . Na slici 3 prikazani su omjeri izmjenjenog i karakterističnog intenziteta, normirani na 1, za određenu energiju.



Slika 3. Grafički prikaz ovisnosti relativne efikasnosti o energiji zračenja. Vidljiv je trend smanjenja efikasnosti s povećanjem energije. Krivulja na slici, logaritamski polinom petog stupnja, dobivena je prilagodbom na mjerenja.

Krivulja na slici dobivena je prilagodbom na mjerenja, a korištena je sljedeća funkcija:

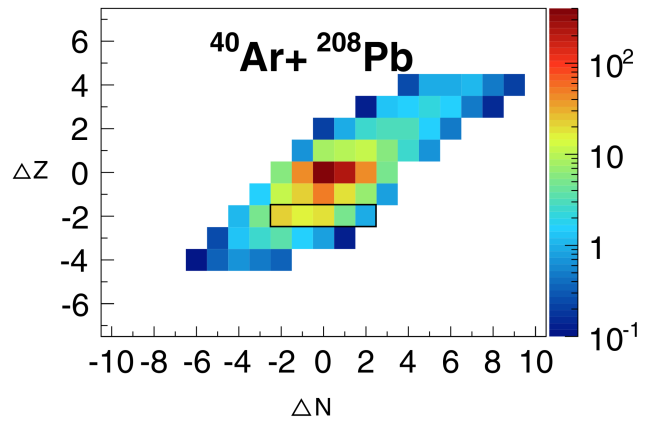
$$ef(E) = \sum_{i=0}^5 a_i \ln(E)^i. \quad (4)$$

Rezultirajući parametri su sljedeći: $a_0 = (129 \pm 59)$, $a_1 = (89 \pm 44)$, $a_2 = (24 \pm 13)$, $a_3 = (3 \pm 2)$, $a_4 = (0.2 \pm 0.1)$, $a_5 = (0.005 \pm 0.004)$.

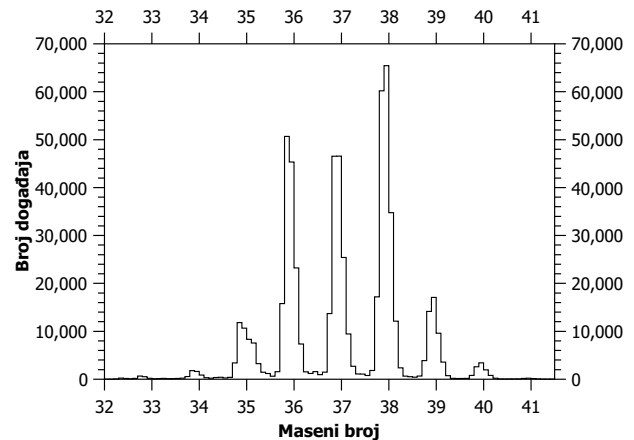
Velike pogreške u koeficijentima a_i posljedica su velike neodređenosti same efikasnosti što se vidi na slici 3. Unatoč tome krivulja dobro prati mjerene podatke. Greška koja je mogla doći zbog pogreške u određivanju parametara krivulje utjecala bi samo na intenzitete zraka, ali ne i energiju γ -zračenja, koja je određena precizno (~ 1 keV).

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Svi izlazni kanali koji su dobiveni u ovom eksperimentu, nuklearnom reakcijom $^{40}\text{Ar} + ^{208}\text{Pb}$, prikazani su na slici 4. Izlazni kanali velikog su raspona pa tako imamo prijenose i do ± 4 protona, $+9, -6$ neutrona, tj. u izlaznom kanalu možemo naći elemente od silicija do titanija. Poblje smo proučili spektre sumpora i to one neutronske bogatije (maseni broj veći od 35). Takva mjerenja označena su na slici 4 crnim okvirom te su prikazana na slici 5 kao ovisnost broja događaja o masenom broju.



Slika 4. Udarni presjeci za izlazne kanale u nuklearnoj reakciji na meti ^{208}Pb s projektilom ^{40}Ar . Detaljnije ćemo proučavati podatke označene crnim okvirom, tj. jezgre sumpora masenog broja 36-40.^[7]



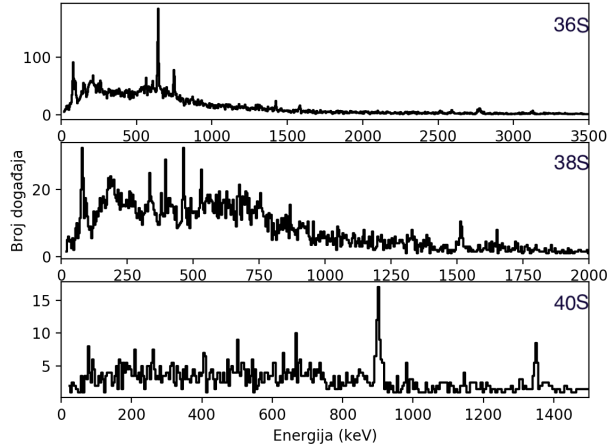
Slika 5. Ovisnost broja događaja o masenom broju za jezgre sumpora u izlaznom kanalu. Uočavaju se značajni vrhovi na masenim brojevima od 35-40. Odabiremo događaje za masene brojeve od 36-40.

Možemo vidjeti da se statistika smanjuje s povećanjem broja neutrona, što može rezultirati većim neodređenostima u intenzitetu i širini γ -prijelaza.

III.1. Parne jezgre

Na slici 6 prikazani su spektri parnih jezgri (^{36}S , ^{38}S , ^{40}S). Na slikama je prikazan dio energetskog spektra koji je bitan za ovo razmatranje tj. u kojima su primijećeni γ -vrhovi. U tablicama I, II i III popisane su energije uočenih γ -prijelaza E s pripadajućim pogreškama ΔE , vrijednosti koje su u bazi podataka NNDC ili su uočene u znanstvenim člancima E_{bp} , pripadni intenziteti s pogreškom normirani na najjači vrh I , Δ_I te odgovarajući

podatci za prijelaze koji su također preuzeti iz baze podataka i znanstvenih članaka $J_i \rightarrow J_f$. Spinovi navedeni u zagradama nisu još potvrđeni. Za svaku jezgru napravljene su sheme nivoa na kojima se nalaze i predviđene teorijske vrijednosti, prema modelu ljusaka, samo za nivoe koji su opaženi.



Slika 6. Spektri parnih jezgri sumpora masenog broja 36, 38 i 40, odozgo prema dolje.

Jezgra ^{36}S

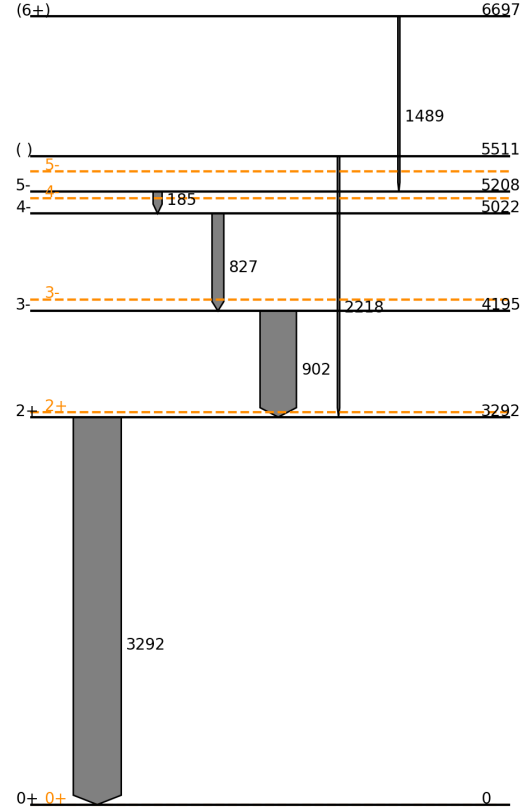
Jezgra sumpora masenog broja 36 posebno je zanimljiva jer se radi o jezgri s magičnim brojem nukleona. Rezultati za ^{36}S popisani su u tablici I. Svi γ -prijelazi koje smo uočili već su zapisani u bazama podataka, a slaganje je jako dobro (~ 1 keV).

Tablica I. Rezultati mjerenja za jezgru ^{36}S . Energije uočenih γ -prijelaza s pripadajućim pogreškama E , ΔE dane su u keV kao i vrijednosti iz baze podataka NNDC, E_{bp} . Izmjereni intenziteti s pogreškom I , ΔI normirani su na najjači γ -vrh (3292 keV) u spektru. FWHM označava eksperimentalnu širinu vrha na pola visine. Spinovi početnog J_i i konačnog stanja J_f preuzeti su iz NNDC baze podataka i znanstvenih članaka. Spinovi navedeni u zagradama nisu još potvrđeni. Veličine navedene u zagradama označavaju eksperimentalnu pogrešku.

$E(\text{keV})$ (ΔE)	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta I)$	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	$2^+ \rightarrow 0^+$

Sheme nivoa za ^{36}S i pripadajuće teorijski očekivane vrijednosti^[10] prikazani su na slici 7. Debljina strelice

određena je intenzitetom, tako da deblja strelica predstavlja veći intenzitet. Eksperimentalno izmjerena vrijednost energije stanja 2^+ izvršno se podudara s teorijom modela ljusaka, što je i očekivano s obzirom da su to fundamentalna stanja sfernog modela ljusaka. Kod stanja negativnog pariteta (3^- , 4^- , 5^-) također je dobro slaganje s teorijom. Budući da smo pronašli račune za energije manje od 5500 keV, usporedba s višim energetske nivoima nije moguća.



Slika 7. Shema nivoa za sumpor 36. Crtkana linija predstavlja teorijski dobivene energetske nivoe prema modelu ljusaka.^[10]

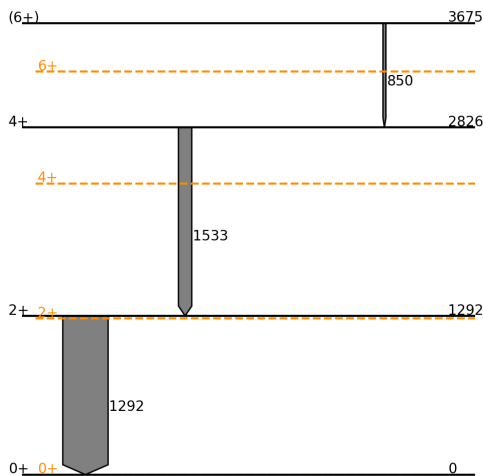
Jezgra ^{38}S

Od uočenih γ -prijelaza za jezgru ^{38}S (tablica II) zanimljivi su prijelazi na 383.6 i 850 keV jer nisu zabilježeni u bazama podataka, ali su opaženi u znanstvenim člancima.^[5] Budući da smo ih i mi uočili to je dodatna potvrda njihovog postojanja.

Tablica II. Rezultati mjerenja za jezgru ^{38}S . Energije uočenih γ -prijelaza s pripadajućim pogreškama E , ΔE dane su u keV kao i vrijednosti iz baze podataka NNDC tj. znanstvenih članaka, E_{bp} . Izmjereni intenziteti s pogreškom I , ΔI normirani su na najjači γ -vrh (1292 keV) u spektru. FWHM označava eksperimentalnu širinu vrha na pola visine. Spinovi početnog J_i i konačnog stanja J_f preuzeti su iz NNDC baze podataka i znanstvenih članaka. Spinovi navedeni u zagradama nisu još potvrđeni. Veličine navedene u zagradama označavaju eksperimentalnu pogrešku.

$E(\text{keV})$ (ΔE)	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta I)$	FWHM	$J_i \rightarrow J_f$
383.6 (0.6)	383 ^[5]	0.04 (0.24)	1.64	
850.0 (0.6)	849 ^[5]	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	$4^+ \rightarrow 2^+$

Spin početnog i konačnog stanja za γ -zraku energije 383.6 keV nije određen pa u shemi nivoa za ^{38}S (slika 8) nedostaje γ -zraka te energije. Vidimo pobuđivanje yrast stanja (najniže stanje za dani angularni moment ili stanja najvišeg angularnog momenta na danoj energiji) $2^+, 4^+, 6^+$ koja se dominantno pobuđuju u reakcijama prijenosa mnogo nukleona. Model ljusaka^[4] dobro opisuje spin i paritet pobuđenih stanja. Energija 2^+ stanja je odlično predviđena. Porastom energije pobuđenja odstupanja između eksperimenta i teorije postaju sve veća.



Slika 8. Shema nivoa za ^{38}S . Crtkana linija predstavlja teorijski dobivene energijske nivoe prema modelu ljusaka.^[4]

Jezgra ^{40}S

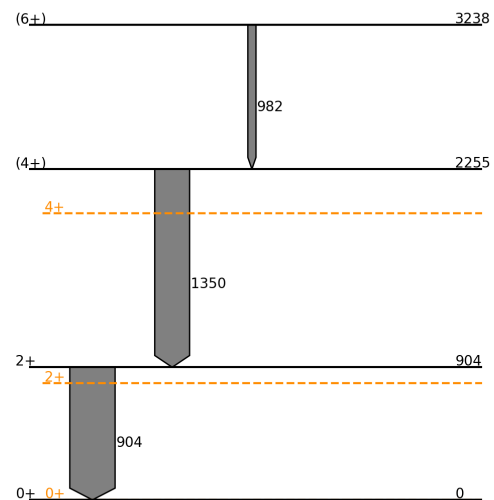
Posebno zanimljive prijelaze pronašli smo za ^{40}S (tablica III) na energijama 409.7 i 669.7 keV. Takvi prijelazi nisu do sad popisani u bazama podataka, ni uočeni u znanstvenim člancima ni literaturi koju smo proučili. Intezitet vrhova ovih prijelaza je 18% od

najjačeg vrha, što nije zanemarivo i svakako bi ih trebali detaljnije proučiti. Iz tog razloga navedeni prijelazi nisu ucrtani na shemi nivoa (slika 9).

Tablica III. Rezultati mjerenja za jezgru ^{40}S . Energije uočenih γ -prijelaza s pripadajućim pogreškama E , ΔE dane su u keV kao i vrijednosti iz baze podataka NNDC tj. znanstvenih članaka, E_{bp} . Izmjereni intenziteti s pogreškom I , ΔI normirani su na najjači γ -vrh (904 keV) u spektru. FWHM označava eksperimentalnu širinu vrha na pola visine. Spinovi početnog J_i i konačnog stanja J_f preuzeti su iz NNDC baze podataka i znanstvenih članaka. Spinovi navedeni u zagradama nisu još potvrđeni. Veličine navedene u zagradama označavaju eksperimentalnu pogrešku.

$E(\text{keV})$ (ΔE)	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta I)$	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	$(4^+) \rightarrow 2^+$

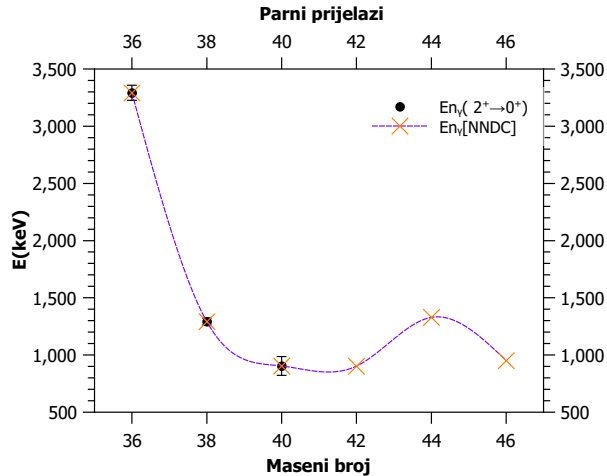
Teorijski račun^[9] za model ljusaka (slika 9) dobro predviđa prvo pobuđeno stanje dok je stanje (4^+) predviđeno na 200 keV nižoj energiji nego je eksperimentalno opaženo.



Slika 9. Shema nivoa za ^{40}S . Crtkana linija predstavlja teorijski dobivene energijske nivoe za model ljusaka.^[4]

Sumirani rezultati za parne jezgre za energije prijelaza $2^+ \rightarrow 0^+$ za različite masene brojeve prikazani su na slici 10. Budući da smo u mjerenjima imali dovoljnu statistiku samo za tri parne jezgre sumpora, poslužili smo se podacima iz baza podataka (prikazani križićima na

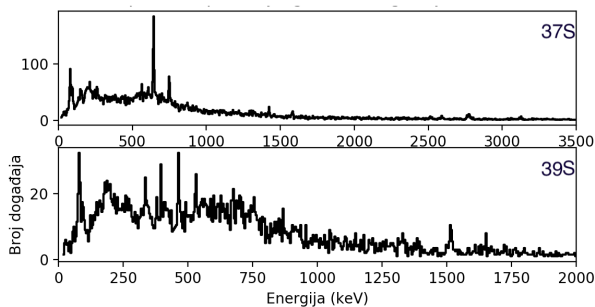
slici). Krivulja na slici nije parametarska, već je samo u svrhi pokazivanja trenda. Energija prvog pobuđenog stanja najniža je između dva magična broja, za jezgru ^{40}S . Suprotno očekivanjima da će dvije magične jezgre imati značajno veću energiju prvog pobuđenog stanja od ostalih, jezgra sumpora masenog broja 44 odstupa od toga, što upućuje na nepotpunost modela ljusaka.



Slika 10. Ovisnost energije γ -zračenja o masenom broju za prijelaz $2^+ \rightarrow 0^+$. Crne točke prikaz su mjerenja dok su križići veličine koje su preuzete iz baze podataka (NNDC). Krivulja koja je prikazana na slici nije prilagodbeno krivulja, već polinomna veza koja povezuje točke.

III.2. Neparne jezgre

Dijelovi energetskih spektara neparne jezgre sumpora ^{37}S i ^{39}S na kojima su uočeni γ -vrhovi prikazani su na slici 11. Kao i za parne jezgre podaci o zapaženim γ -vrhovima se nalaze u tablicama IV i V, a na pripadajućim shemama nivoa nalaze se eksperimentalne i teorijske energetske vrijednosti nivoa (samo teorijske vrijednosti onih nivoa koji su opaženi).



Slika 11. Spektri neparne jezgre sumpora masenog broj 37 i 39, odozgo prema dolje.

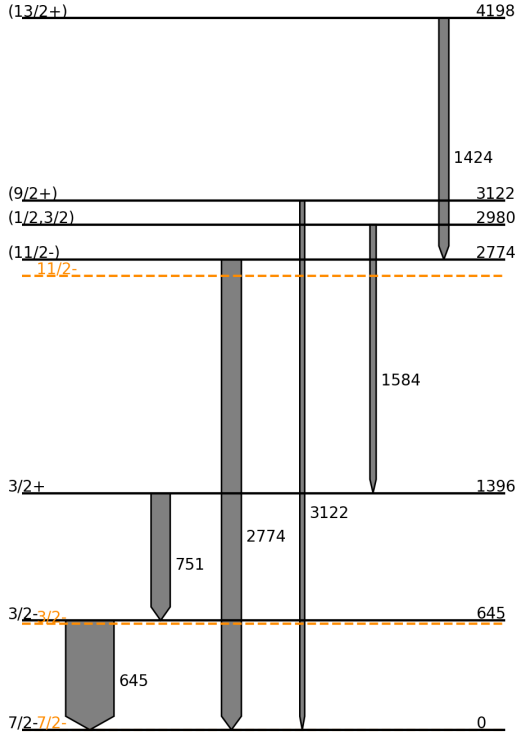
Jezgra ^{37}S

Samo dvije energije prijelaza koje smo opazili upisane su u bazu podataka NNDC, dok su ostale već detektirane i prethodno objavljene u znanstvenim člancima.^[3,6] Ovim mjerenjem još jednom smo pokazali njihovo postojanje pa mogu biti prijedlog za upis u bazu podataka. Energija γ -prijelaza 1584 keV prethodno je izmjerena,^[6] ali nije određen spin i paritet prijelaza. U članku^[3] je prikazana shema energetskih nivoa gdje je upisan energetski nivo na 2978 keV pa bi to mogao biti početni nivo za γ -prijelaz energije 1584 keV.

Tablica IV. Rezultati mjerenja za ^{37}S . Energije uočeni γ -prijelaza s pripadajućim pogreškama E , ΔE dane su u keV kao i vrijednosti iz baze podataka NNDC tj. znanstvenih članaka E_{bp} . Izmjereni intenziteti s pogreškom I , ΔI normirani su na najjači γ -vrh (645 keV) u spektru. FWHM označava eksperimentalnu širinu vrha na pola visine. Spinovi početnog J_i i konačnog stanja J_f preuzeti su iz NNDC baze podataka i znanstvenih članaka. Spinovi navedeni u zagradama nisu još potvrđeni. Veličine navedene u zagradama označavaju eksperimentalnu pogrešku.

$E(\text{keV})$ (ΔE)	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta I)$	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) ^[3]	0.2 (0.1)	12.9	$(\frac{13}{2}^+) \rightarrow (\frac{11}{2}^-)$
1584 (1)	1583 ^[6]	0.13 (0.08)	8.65	$(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}) \rightarrow (\frac{3}{2}^+)$
2774 (1)	2776(2) ^[3]	0.41 (0.09)	27.5	$(\frac{11}{2}^-) \rightarrow (\frac{7}{2}^-)$
3123 (3)	3120(2) ^[3]	0.10 (0.07)	17.9	$(\frac{9}{2}^+) \rightarrow (\frac{7}{2}^-)$

Slaganje s nivoima koji su predviđeni modelom ljusaka^[3] je u nižim pobuđenim nivoima dobro, ali pozitivna stanja pariteta nisu predviđena tim modelom iako su opaženi s velikim intenzitetom (slika 12). Takva stanja nazivaju se uljezna stanja ili *intruder stanja* i često su jako deformirana. Jako pobuđeno stanje $\frac{11}{2}^-$ može se opisati kao vezanje nesporenog neutrona u jezgri ^{37}S na fonon 2^+ stanja u jezgri ^{36}S .



Slika 12. Shema nivoa za sumpor 37. Crtkana linija predstavlja teorijski dobivene energijske nivoe prema modelu ljustaka.^[3]

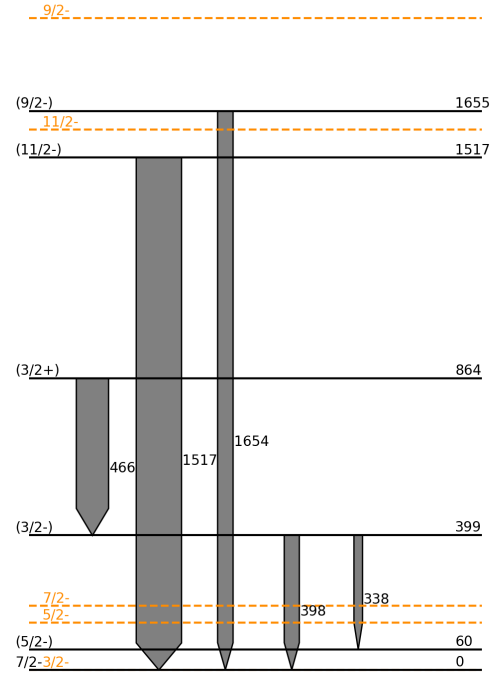
Jezgra ^{39}S

Dvije energije prijelaza (338.6 i 533.4 keV) koje su već uočene, ali nisu zapisane u bazi podataka, našim mjerenjem su potvrđene još jednom.

Tablica V. Rezultati mjerenja za jezgru ^{39}S . Energije uočenih γ -prijelaza s pripadajućim pogreškama E , ΔE dane su u keV kao i vrijednosti iz baze podataka NNDC tj. znanstvenih članaka E_{bp} . Izmjereni intenziteti s pogreškom I , ΔI normirani su na najjači γ -vrh (1517 keV) u spektru. FWHM označava eksperimentalnu širinu vrha na pola visine. Spinovi početnog J_i i konačnog stanja J_f preuzeti su iz NNDC baze podataka i znanstvenih članaka. Spinovi navedeni u zagradama nisu još potvrđeni. Veličine navedene u zagradama označavaju eksperimentalnu pogrešku.

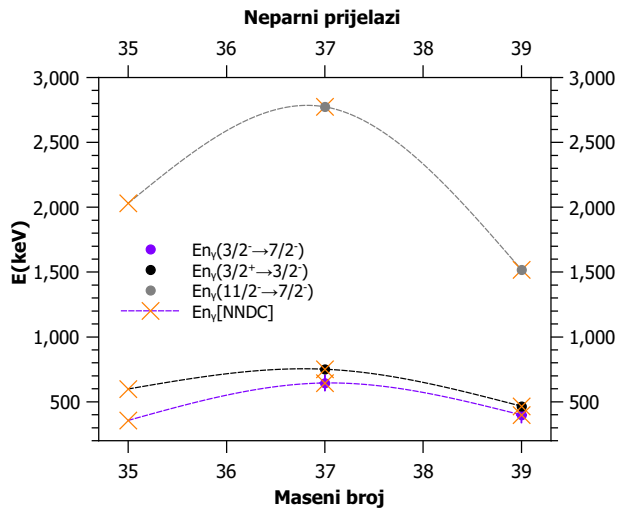
$E(\text{keV})$ (ΔE)	$E_{bp}(\text{keV})$	$I(\Delta I)$	FWHM	$J_i \rightarrow J_f$
338.6 (0.9)	339(1) ^[4]	0.2 (0.2)	4.2	$(\frac{3}{2}^-) \rightarrow (\frac{5}{2}^-)$
398.6 (0.5)	398.6 (0.1)	0.3 (0.3)	3.3	$\frac{3}{2}^- \rightarrow \frac{7}{2}^-$
466.0 (0.5)	465.5 (0.2)	0.7 (0.4)	6.5	$\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{3}{2}^-$
533.4 (0.3)	533(4) ^[9]	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	$\frac{9}{2}^- \rightarrow \frac{7}{2}^-$

Shematski prikaz energetskih nivoa za jezgru ^{39}S je prikazan na slici 13. Stanja pozitivnog pariteta, uljezna stanja, koja su opažena i kod jezgre ^{37}S , iako su opažena s velikim intenzitetom, nisu predviđena u modelu ljustaka. Da bi opisali stanja pozitivnog pariteta trebalo bi proširiti konfiguracijski prostor u modelu ljustaka, što otežava sam račun. Kao i kod jezgre ^{37}S pobuđeno je stanje $\frac{11}{2}^-$ te se može objasniti na isti način. Zanimljivo je da za jezgru ^{39}S ni u najnižim pobuđenim energetskim nivoima teorija^[9] ne opisuje eksperiment, čak predviđa i drugačiji raspored samih nivoa.



Slika 13. Shema nivoa za sumpor 39. Crtkana linija predstavlja teorijski dobivene energijske nivoe prema modelu ljustaka.^[4]

Sumirani rezultati za neparne jezgre sumpora na slici 14 pokazuju očekivani trend da jezgre s brojem neutrona najbližem magičnom broju imaju najveću energiju γ -zrake za određeni prijelaz.



Slika 14. Ovisnost energije γ -zračenja o masenom broju za prijelaze $3/2^- \rightarrow 7/2^+$, $3/2^+ \rightarrow 3/2^-$ i $11/2^- \rightarrow 7/2^-$. Točke su prikaz mjerena dok su križići veličine koje su preuzete iz baze podataka (NNDC). Krivulja koja je prikazana na slici nije prilagodbeni krivulja, već polinomna veza koja povezuje točke.

IV. ZAKLJUČAK

Cilj ovog seminara bio je iz podataka koje smo dobili reakcijom sudara mete ^{208}Pb i projektila ^{40}Ar proučiti spektre neutronske bogatih jezgara sumpora te pokušati pronaći nepotvrđene i neotkrivene prijelaze. Do sad smo pronašli par neotkrivenih prijelaza za jezgro ^{40}S (409.7 i 669.7 keV) te mnogo više već detektiranih, ali nepotvrđenih prijelaza. Uspoređujući nivoe koji su pobuđeni u ovoj reakciji s teorijski predviđenim modelom ljusaka uvidjeli smo neslaganje, pogotovo na višim pobuđenim nivoima. U mjerenjima smo opazili snažna yrast stanja. U neparnim jezgrama izmjenili smo jaka pobuđenja stanja jednočestičnog karaktera te pobuđenja stanja koja se mogu objasniti vezanjem nesporenog neutrona na 2^+ stanja pripadajućih parno-parnih jezgri (jaka pobuđenja stanja $\frac{11}{2}^-$).

Ovakva istraživanja uvjet su za potpuno opisivanje svojstava jezgre i nadopunjavanje te korekcije sadašnjih teorijskih modela.

¹ NNDC. Karta nuklida. Brookhaven National Laboratories. <http://www.nndc.bnl.gov/>

² Clover konfiguracija. LNL INFN. http://www.lnl.infn.it/~prisma/clara_technical/node3.html

³ 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.

⁴ Chapman, R., Wang, Z. M., Bouhelal, M., Haas, F., Liang, X., Azaiez, F., ... Curien, D. (2016). First in-beam γ -ray study of the level structure of neutron-rich S 39. *Physical Review C*, 94(2), 024325.

⁵ Wang, Z. M., Chapman, R., Liang, X., Haas, F., Azaiez, F., Behera, B. R., ... Deacon, A. N. (2010). γ -ray spectroscopy of neutron-rich S 40. *Physical Review C*, 81(5), 054305.

⁶ 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

⁷ Mijatović, T., Szilner, S., Corradi, L., Montanari, D., Pollarolo, G., Fioretto, E., ... Milin, M. (2016). Multinucleon transfer reactions in the Ar 40+ Pb 208 system. *Physical Review C*, 94(6), 064616.

⁸ Mijatovic, T. (2015). Study of heavy-ion reactions with large solid angle magnetic spectrometers (Doctoral dissertation, FACULTY OF SCIENCE, University of Zagreb).

⁹ Lunderberg, E., Gade, A., Bader, V., Baugher, T., Bazin, D., Berryman, J. S., ... Weisshaar, D. (2016). In-beam γ -ray spectroscopy of S 38–42. *Physical Review C*, 94(6), 064327.

¹⁰ Deša Jelavić Malenica (2013) Seminar iz Teorije strukture atomske jezgre 1: Kompletni račun modela ljusaka za ^{36}S . Institut Ruder Bošković, ZEF, LNF