

## Rezultate obtinute

### 1. Rezultate Etapa 2015:

Pentru a studia nucleele din zona hărții nuclizilor aflată în jurul izotopului  $^{90}\text{Zr}$  ne-am propus să folosim reacția de fuziune-evaporare  $^{13}\text{C}+^{82}\text{Se}$ .

Prima activitate a constat în prepararea țintei de  $^{82}\text{Se}$ , pentru care s-a calculat o grosime necesară de  $5\text{mg}/\text{cm}^2$  și o grosime a suportului din Au de  $5\text{mg}/\text{cm}^2$ . Pentru realizarea țintei s-a utilizat metoda de depunere de straturi subțiri prin evaporare termică rezistivă în vid înalt; metoda efectivă a fost inițial testată folosind Se natural în vederea optimizării parametrilor, după care s-a trecut la realizarea efectivă a țintei. Materialul necesar este îmbogățiti izotopic, având o concentrație de  $^{82}\text{Se}$  de 99,93%. Pentru realizarea țintei s-au folosit 45 mg de pulbere, care a fost presată sub forma unei pastile cu diametru de 5 mm folosind o presă hidraulică automată; pastila astfel obținută a fost apoi introdusă într-un creuzet de Ta fixată între electrozi de înaltă tensiune în interiorul camerei de vid a sistemului de evaporare. Folia de Au ( $5\text{mg}/\text{cm}^2$ ) ce a fost folosită ca strat de suport pentru țintă a fost pregătită în prealabil prin roluire la rece, apoi a fost lipită pe un suport de țintă. Sistemul format din suport de țintă + Au ( $5\text{mg}/\text{cm}^2$ ) s-a montat la 1,5 cm deasupra bărcuței de tantal pe un substrat corespunzător.

A doua activitate a constat în realizarea experimentului. Pentru a analiza canalele ce se pot deschide în reacție și secțiunile eficace a acestora, ca și pentru a alege energia optimă a fascicolului de  $^{13}\text{C}$  pentru experimentul nostru, s-au făcut simulări folosind programul CASCADE, din care a rezultat că, pentru energii de accelerare a fascicolului ce pot fi atinse cu acceleratorul Tandem, nucleele de interes ce se produc cu secțiuni eficace foarte mari și mari sunt:  $^{91}\text{Zr}$  - canalul de evaporare a 4 neutroni,  $^{92}\text{Zr}$  - canalul de evaporare a 3 neutroni,  $^{89}\text{Sr}$  - canalul de evaporare a 2 neutroni și 1 particulă  $\alpha$ . Pentru experimentul de față s-a ales o energie a fascicolului de 42 MeV, iar curentul pe țintă a fost de aproximativ 2 pA. Radiațiile gama emise în dezexcitarea nucleelor populate în reacție au fost detectate folosind ansamblul multi-detector RoSPHERE din cadrul Departamentului de Fizică Nucleară al IFIN-HH, care poate include până la 25 detectori montați în diverse configurații. În experimentul  $^{13}\text{C}+^{82}\text{Se}$ , RoSPHERE a fost montat în configurația mixtă, cu 14 detectori HPGe și 11 detectori scintilatori din LaBr3(Ce). În experimentul de față logica semnalului de *trigger* a cerut ca cel puțin

un detector HPGe și doi detectori LaBr<sub>3</sub>:Ce să fi produs un semnal în coincidență. Atât înainte de începerea experimentului, cât și după finalizarea acestuia s-au achiziționat date pentru sursele etalon de <sup>152</sup>Eu și <sup>60</sup>Co în vederea calibrării energetice a spectrelor gama și pentru a efectua corecția de walk.

Experimentul a fost desfășurat în 3 etape:

- la energia de 42 MeV a fascicolului continuu de <sup>13</sup>C, în vederea optimizării secțiunilor eficiente pentru nuclee apropiate de <sup>90</sup>Zr. Această primă etapă a asigurat deci popularea cu preponderență a canalelor de interes, ceea ce va permite în analiza datelor identificarea cu certitudine a gamelor ce dezintegrează aceste nuclee.
- cu fascicul pulsant, la aceeași energie, pentru a putea popula stări deasupra stării izomere 21/2+ din <sup>91</sup>Zr. Acest izomer era cunoscut anterior dintr-un experiment ce a folosit reacția <sup>88</sup>Sr(<sup>6</sup>Li, 2np) și are un timp de viață de 6 μs. Fasciculul pulsant a fost realizat folosind sistemul de pulsare lentă de la Tandem-IFIN-HH ce folosește un chopper. Inițial a fost setat pentru un ciclu de 100 μs (50 μs timp de iradiere, 50 μs timp de achiziție cu fascicul oprit), dar după analiza preliminară a datelor achiziționate, s-a optimizat pulsarea, ciclul fascicolului folosit fiind de 50 μs (25 μs timp de iradiere, 25 μs timp de achiziție cu fascicul oprit).
- cu fascicul continuu de <sup>13</sup>C de energie 48 MeV, pentru a putea popula stări de spin și energie cât mai înaltă. Odată identificate benzile gama din schemele de nivele ale nucleelor de interes folosind datele din prima etapă, prin coincidență gama-gama se vor putea atribui acestora stări noi, de spin și energie mai înaltă.

*În concluzie, se poate spune că rezultatele preconizate au fost atinse, experimentul fiind realizat cu succes, datele obținute urmând a fi prelucrate în etapa următoare.*

## 2. Rezultate Etapa 2016:

Pentru prelucrarea datelor experimentale a fost folosit pachetul de programe GASPware, care a fost folosit atât în etapa de sortare a datelor, cât și în prelucrarea efectivă.

Pentru construirea schemelor de nivele, selecția tranzițiilor γ de interes se face în acest tip de experimente prin construirea de spectre multidimensionale (matrici) în coincidență HPGe-HPGe și HPGe-HPGe-HPGe. În vederea identificării multipolarității tranzițiilor gama, și deci pentru a găsi spinul și paritatea stărilor excitate, s-au determinat rapoarte DCO (corelații direcționale în stări orientate). Pentru aceasta, în sortarea off-line a datelor s-au construit matrici

bidimensionale asimetrice de coincidență  $\gamma$ - $\gamma$  corespunzând anumitor unghiuri – în cazul nostru 90 și 35 grade. Din prelucrarea datelor experimentale s-au obținut scheme noi de nivele pentru nucleele  $^{92}\text{Zr}$  și  $^{91}\text{Zr}$ .

În cazul  $^{92}\text{Zr}$  identificarea stărilor excitate a pornit de la prima tranziție cunoscută, de 934.5 keV,  $2^+ \rightarrow 0^+$ ; folosind condiționări energetice au fost deduse tranzițiile în coincidență; poziția nivelelor excitate a fost suplimentar confirmată prin identificarea unor tranziții inter-benzi. Trebuie specificat faptul că existența, ordinea și modul de dezexcitare a nivelelor cu energii de 2743, 2340, 2398, 4214, 3998 keV nu ar fi putut fi dovedită fără folosirea coincidențelor triple, care a permis pe lângă identificarea acestor nivele noi, să infirmăm o serie de rezultate prezentate în articole publicate de către alți autori. Față de rezultatele existente în literatura de specialitate la data experimentului, aceasta a dus la corectarea energiei nivelelor excitate și obținerea unei scheme de nivele corecte. Energia nivelelor a fost stabilită prin determinarea energiei gamelor ce le dezexcită, prin fitarea peak-urilor respective în spectru. În stabilirea ordinii tranzițiilor gama într-o structură tip bandă s-a ținut cont, pe lângă relațiile de coincidență, de intensitățile acestor tranziții. Pentru completitudine, acolo unde a fost posibil au fost determinate rapoarte DCO.

În cazul izotopului  $^{91}\text{Zr}$  trebuie ținut cont de faptul că nivelul  $21/2^+$  cu energia de 3167 keV este un nivel izomer cu  $T_{1/2} = 6.2 \mu\text{s}$  și datorită existenței acestui izomer destul de lung, schema de nivele trebuie investigată separat, pentru nivelele excitate cu energie inferioară stării izomere și pentru nivelele excitate cu energie superioară acesteia. De un interes deosebit din punct de vedere al tematicii și obiectivului general al proiectului sunt însă stările de energie joasă, aici așteptându-ne să identificăm tranziții E3 de pe stări datorate cuplajului particulă – fonon octupolar. Prin prelucrarea datelor experimentale s-a obținut schema de nivele excitate a  $^{91}\text{Zr}$  la energii joase; au fost identificate o serie de tranziții gama și nivele excitate noi, în principal tranziții de intensitate mică dar pentru care statistica a fost suficient de mare pentru a fi observate. Ca și în cazul anterior, energia nivelelor a fost stabilită prin determinarea energiei gamelor ce le dezexcită prin fitarea peak-urilor respective în spectru, iar acolo unde a fost posibil au fost determinate rapoarte DCO.

Determinarea timpilor de viață ale nivelelor nucleare reprezintă un obiectiv experimental esențial pentru înțelegerea structurii nucleelor. Procedeu utilizat în cadrul prezentului proiect se adresează timpilor de viață nucleari cu valori cuprinse între 0.05

ns și 100 ns, folosește o metodă directă de măsurare a diferenței de timp dintre momentul producerii și cel al dezexcitării nivelului nuclear studiat și are avantajul că este efectuat *in beam*. După ce datele au fost calibrate, corectate pentru deplasarea amplificării (ca poate varia în cazul detectorilor de LaBr<sub>3</sub> cu rata de numărare) și pentru walk, datele obținute cu detectorii de LaBr<sub>3</sub> au fost sortate în cuburi  $E_{\gamma 2} - E_{\gamma 1} - \Delta T$ . Aceste matrici de coincidență asimetrice au fost apoi folosite pentru a obține spectrele de timp pentru anumite tranziții gama, spectre ce au fost fitate în vederea determinării timpului mediu de viață pentru nivelele investigate. O primă etapă a avut ca scop măsurarea unori timpi de viață cunoscuți pentru care s-a considerat că este necesară confirmarea valorii sau corectarea valorii cunoscute: cel al stării yrast 4+ din <sup>92</sup>Zr, care fusese anterior măsurat cu metoda  $\beta$ - $\gamma$ -fast-timing, valoarea obținută în experimentul de dezintegrare  $\beta$  a <sup>92</sup>Y fiind de  $\tau = 147$  ps, respectiv a stării yrast 8+ din <sup>92</sup>Zr ce fusese măsurat într-un experiment tip Plunger și pentru care valoarea era de 1.7 ns. Pentru starea excitată yrast 4+ de energie 1495.5 keV din <sup>92</sup>Zr, s-a obținut un timp de viață de  $\tau=149$  ps, în bun acord cu valoarea anterior cunoscută de 147 ps. Trebuie menționat faptul că valoarea de 147 ps fusese obținută folosind un cristal plastic scintilator de BaF<sub>2</sub>, ceea ce de obicei asigură o acuratețe foarte bună a măsurătorilor, mai bună decât în cazul LaBr<sub>3</sub>; concordanța valorii obținute în cadrul prezentului experiment cu valoarea măsurată cu BaF<sub>2</sub> ne indică faptul că măsurătorile și procedura de lucru pe care le-am folosit au performanțe deosebit de bune. Pentru starea excitată yrast 8+ de energie 3309.6 keV din <sup>92</sup>Zr s-a obținut un timp de viață de  $\tau=1.13$  ns, valoare relativ depărtată de rezultatul cunoscut anterior, de 1.7 ns. Cu toate acestea, considerăm ca valoarea obținută de noi prezintă încredere, atât deoarece am testat metoda în cazul stării 4+, cât și datorită faptului că este posibil ca în raportarea valorii anterioare pentru 8+ să se fi strecurat o greșeală, ținând cont de faptul că pentru  $T_{1/2}=1.7$  ns valoarea timpului de viață ar fi de  $\tau=1.18$  ns, în acord cu valoarea determinată în urma experimentului nostru. Pasul următor a constat în determinarea timpului de viață al nivelului 11/2- din <sup>91</sup>Zr care se dezexcită printr-o radiație gama de tip E3 și care deci este un bun candidat pentru a fi un nivel construit prin cuplaj cu un fonon octupolar. Pentru aceasta, semnalul de start va fi dat de tranziția cu energia de 89 keV, iar cel de stop de tranziția cu energia de 2170 keV. Timpul de viață obținut în premieră pentru nivelul 11/2- este de  $500 \pm 16$  ps. Această valoare corespunde unei tării  $B(E3) \approx 20$  W.u., ceea ce

ne indică concluzia că există corelații ocupolare semnificative atât în  $^{91}\text{Zr}$  cât și în miezul  $^{90}\text{Zr}$ .

*În concluzie, se poate spune că rezultatele preconizate au fost atinse, din prelucrarea datelor experimentale pentru nuclee din zona  $^{90}\text{Zr}$  fiind obținute scheme de nivele și realizate determinări de timpi de viață a unor stări excitate, rezultatele urmând a fi interpretate și discutate în etapa următoare.*

*Trebuie menționat faptul că a fost publicat 1 articol ISI în revista Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A și au fost făcute 2 comunicări orale la conferințe internaționale.*

### *3. Rezultate Etapa 2017:*

În vederea interpretării teoretice s-au făcut calcule de model în pături. Nucleul  $^{91}\text{Zr}$  a fost interpretat în cadrul schemei de cuplaj J-J folosind codul NuShellX@MSU și utilizând spațiul de model *glekpn* ce permite excitații protonice peste închiderea de pătură  $Z = 20$ :  $\pi f_{7/2}$ ,  $f_{5/2}$ ,  $p_{3/2}$ ,  $p_{1/2}$ ,  $g_{9/2}$ . Pentru neutroni, orbitalii disponibili sunt delimitați de  $N = 40$  și  $N = 70$ :  $\nu g_{9/2}$ ,  $g_{7/2}$ ,  $d_{5/2}$ ,  $d_{3/2}$  și  $s_{1/2}$ . Considerând acest spațiu uriaș de diagonalizare, toate calculele teoretice prezentate au fost realizate impunând restricțiile: orbitalul  $\pi f_{7/2}$  (protoni) trebuie să rămână complet plin în timp ce orbitalul  $\nu g_{9/2}$  (neutroni) a fost constrâns în calculul 1 să fie complet plin, iar în calculul 2 conține cel puțin 9 neutroni. Interacția efectivă *glekpn* s-a dovedit a reproduce corect succesiunea de stări excitate din  $^{91}\text{Zr}$  precum și spinul și paritatea stării fundamentale. Nucleul  $^{90}\text{Zr}$  a fost descris în cadrul aceleiași scheme de cuplaj și în același spațiu delimitat de interacția *glekpn*. Pentru acest studiu au fost descrise și sunt de interes doar primele stări de spin  $0^+$ ,  $2^+$  și  $3^-$ . Toate cele trei stări descrise conțin componente dominante și deși restricțiile calculului sunt identice cu cele prezentate anterior și anume partiția neutronică favorizată a fost cea în care neutronii cuplează la spinul total  $J_\nu = 0^+$ , cu factorul de ocupare pentru orbitalul  $g_{9/2}$  egal cu 10. Promovarea unui neutron de

pe orbitalul  $g_{9/2} \rightarrow d_{5/2}$  sau  $g_{9/2} \rightarrow g_{7/2}$  nu este favorizată și prin urmare este preferată umplerea completă a orbitalului ce determină  $N = 50$ . În ansamblu, interacția *glekpn* descrie satisfăcător observabilele experimentale. A fost reprodusă corect atât poziția energetică, ordinea spinilor și parităților cât și timpul de viață pentru starea 3-. Raportul  $\lambda_{TH}(E3) / \lambda_{Wu}(E3) = 7.56 Wu$  (comparat cu 15.201 Wu, dat de valoarea experimentală) indică, așa cum era de așteptat, un grad mic de colectivitate ce poate fi atribuit gradelor de libertate de vibrație în jurul formei sferice.

*Trebuie menționat faptul că au fost publicate 5 articole ISI în revistele Physical Review C, Physical Review Letters, Radiation Physics and Chemistry și Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A.*

## **Obtained results**

### *1. Results obtained in 2015:*

In order to study the nuclei in the nuclide chart area close to the  $^{90}\text{Zr}$  isotope we decided to use the fusion-evaporation reaction  $^{13}\text{C}+^{82}\text{Se}$ .

The first step consisted in producing the experimental target, for which was calculated a necessary thickness of  $5\text{mg}/\text{cm}^2$  of  $^{82}\text{Se}$  and  $5\text{mg}/\text{cm}^2$  thickness for the Au backing. The method used for producing the target was thin film deposition through high vacuum thermal (resistive) evaporation; the method was initially tested using natural Se in order to establish and optimise the process parameters. The necessary material that was used was isotopically enriched  $^{82}\text{Se}$  with 99,93% concentration; 45 mg of such powder, pressed as a pill of 5 mm diameter using an automatic hydraulic mill, was used. The pressed powder was put into a Ta crucible fixed between high voltage electrodes, inside the evaporation system vacuum chamber. The Au foil ( $5\text{mg}/\text{cm}^2$ ) to be used as a backing for the target was prepared using cold-rolling, then glued to a target support. The

system target support + Au (5 mg/cm<sup>2</sup>) was mounted at 1,5 cm above the Ta crucible.

For analysing the reaction channels and their cross-sections for our fusion-evaporation reaction and in order to select the optimum beam energy, calculations using CASCADE software were made. It resulted that, for accelerating energies available at our Tandem accelerator, the nuclei of interest that can be produced with high and very high cross-sections are: <sup>91</sup>Zr-4 neutrons evaporation channel, <sup>92</sup>Zr-3 neutrons evaporation channel, <sup>89</sup>Sr-2 neutrons and 1  $\alpha$  evaporation channel. For our experiment, beam energy of over 42 MeV was selected, while the target current was approximately 2 pA. The gamma radiations emitted in the reaction were detected using the multi-detector array RoSPHERE from the Nuclear Physics Department of IFIN-HH. This array can include up to 25 detectors mounted in various configurations; for the <sup>13</sup>C+<sup>82</sup>Se experiment, RoSPHERE was assembled in a mixed configuration, with 14 HPGe and 11 LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillator detectors. For this experiment, the logic of the *trigger* signal asked that at least 1 HPGe detector and 2 LaBr<sub>3</sub>:Ce detectors to fire in coincidence. Both before and after the ongoing of the experiment, the <sup>152</sup>Eu și <sup>60</sup>Co etalon sources were used in order to acquire data for the energy calibration and walk correction of the spectra.

The experiment was made in 3 steps:

- Using a <sup>13</sup>C continuous beam of 42 MeV energy – this step allowed to greatly produce the reaction channels of interest, so by analysing the acquired data to be able to identify with a high degree of accuracy the gamma rays that deexcite the respective nuclei.
- Using a <sup>13</sup>C pulsed beam of 42 MeV energy, for populating excited states above the 21/2+ isomer in <sup>91</sup>Zr. This isomer was previously known from a <sup>88</sup>Sr(<sup>6</sup>Li, 2np) experiment and has a lifetime of 6  $\mu$ s. The beam was pulsed using the slow-pulsing system at Tandem-IFIN-HH that employs a chopper. Initially, the beam was set for a 100  $\mu$ s cycle (50  $\mu$ s timp de iradiere, 50  $\mu$ s timp de achiziție cu fascicul oprit), dar după analiza preliminară a datelor achiziționate, s-a optimizat pulsarea, ciclul fascicolului folosit fiind de 50  $\mu$ s (25  $\mu$ s irradiation with beam on, 25  $\mu$ s data acquisition time with the beam off).
- Using a <sup>13</sup>C continuous beam 48 MeV energy, in order to populate excited states of high energy and spin. After identifying the gammas deexciting states of the nuclei of interest by using data acquired in the first step, the data acquired at 48 MeV energy will

be used to identify new states of high energy and spin.  
*In conclusion the expected results were obtained, the experiment being successfully finished, the experimental data to be subsequently analysed in the next stage of the project.*

## *2. Results obtained in 2016:*

For the processing and analysing of the experimental data, the GASPware software package was used for both sorting and data analysis.

In order to build level schemes for our type of experiment, the selection of the  $\gamma$  transitions of interest is made by first sorting the data into multidimensional coincidence spectra (matrices) HPGe-HPGe and HPGe-HPGe-HPGe. In order to identify the gamma multipolarity, which leads to the spin and parity of excited states, DCO ratios can be used. In this respect, during the off-line data sorting, coincidence bidimensional asymmetric matrices  $\gamma$ - $\gamma$  corresponding to detectors at 90 and 35 degrees were produced. By then analysing the sorted data, new level schemes for the  $^{92}\text{Zr}$  and  $^{91}\text{Zr}$  nuclei were obtained.

In the case of  $^{92}\text{Zr}$ , the identification of excited states started with the lowest known gamma transition of 934.5 keV energy,  $2^+ \rightarrow 0^+$ ; by using successive energy conditions (gates), the transitions in coincidence were deduced; the position of the excited levels was supplementary confirmed by identifying inter- and intra-bands transitions. It must be mentioned the fact that the order and deexcitation pattern of the levels having energies of 2743, 2340, 2398, 4214, and 3998 keV was possible only due to the use of triple gamma coincidences, which allowed to identify these new levels and also to invalidate some results already present in the literature. By comparing our results with those published before the date of our experiment, we can say we were able to correct the excited states energy and thus to obtain an accurate level scheme. The energy of each level was obtained by accurately get the energy of the gamma rays deexciting it through a fit procedure of the respective peaks in the spectra. In order to establish the order of the levels inside a band-type structure we took into account not only coincidence relations between gammas but also their intensity. The obtained information was completed with levels spin values, deduced from DCO.

In the case of the  $^{91}\text{Zr}$  we had to take into account the fact that the  $21/2^+$  level of 3167 keV energy is an isomer with  $T_{1/2} = 6.2 \mu\text{s}$  and due to the existence of this long-lived isomeric state, the level scheme should be investigated separately for the levels with lower than 3167 keV energy and for the levels with higher than 3167 keV



energy. From the point of view of the scientific general objective of this project, the excited states of low energy are of interest, because among them we expected to find E3 gamma transitions deexciting states built due to the particle – octupolar phonon coupling. Following the experimental data analysis, the low-energy excited levels scheme was obtained for  $^{91}\text{Zr}$ . We have identified some new gamma transitions and new excited states that deexcite mainly by low-energy gamma rays of low intensity. As in the case of  $^{92}\text{Zr}$ , the levels energy was established by fitting in the spectra the energy of the gamma rays deexciting them, and whenever the statistics was sufficient to make it possible, DCO ratios were calculated.

Nuclear levels lifetime measurement is very important in order to understand the structure of specific nuclei. For the purpose of the present project we used a lifetime measurement procedure that address nuclear lifetimes in the range of 0.05 ns and 100 ns, uses the direct measurement of the time difference between the production and the deexcitation of the studied nuclear level and has the advantage to be *in beam*. After the experimental data were calibrated, corrected for the walk and for the amplification variation (due to the fact that the amplification can vary with the counting rate in the case of LaBr3 detectors), the obtained data were sorted into asymmetrical coincidece cubes  $E_{\gamma 2} - E_{\gamma 1} - \Delta T$  for the LaBr3 detectors. These matrices were further used in order to obtain the time spectra of gamma transitions of interest, spectra from which the lifetime values for the investigated states were obtained thorough a fit procedure. In the beginning we tested the procedure by analysing some states of lifetimes already known or not so accurately known. In this case we selected: the yrast 4+ state in  $^{92}\text{Zr}$ , for which the lifetime  $\tau = 147$  ps was previously measured with the  $\beta$ - $\gamma$ -fast-timing method, a very accurate method, in a  $^{92}\text{Y}$   $\beta$ -decay experiment; and the 8+ yrast state in  $^{92}\text{Zr}$  for which the lifetime  $\tau = 1.7$  ns was previously measured in a Plunger experiment. For the 4+ yrast state of 1495.5 keV energy in  $^{92}\text{Zr}$  we obtained a lifetime value of  $\tau = 149$  ps, in very good agreement with the previously known value. As the value of 147 ps was measured using a BaF<sub>2</sub> plastic scintillator that usually ensures the highest possible accuracy for the lifetime measurements, the agreement with our measured value leads to the conclusion that our measurement procedure and data processing method has the same very high accuracy. For the 8+ yrast excited state of 3309.6 keV energy in  $^{92}\text{Zr}$  a lifetime value of  $\tau=1.13$  ns was obtained, in disagreement with the previously known value of 1.7 ns. Taking into account that we already proved the accuracy of our method and the

fact that, if we consider the half-life as being  $T_{1/2}=1.7$  ns the lifetime would be  $\tau=1.18$  ns in agreement with ours, we consider that we obtained the correct value and an error was made in the reporting of the results of the previous Plunger experiment.

We continued our work by studying the  $11/2^-$  excited state in  $^{91}\text{Zr}$  that deexcites through a gamma radiation of E3-type – so this state can be a candidate to be a level due to a particle – octupolar phonon coupling. In order to obtain the lifetime of this state, in analysing the data the start signal was selected to be the gamma ray of 89 keV energy, while the stop will be given by the gamma ray of 2170 keV energy. The lifetime value, obtained for the first time for the  $11/2^-$  state is  $500 \pm 16$  ps. This value corresponds to a strength of  $B(E3) \approx 20$  W.u., which indicates that there are significant octupolar correlations both in  $^{91}\text{Zr}$  and in the  $^{90}\text{Zr}$  core.

*In conclusion the expected results were obtained: by analysing the experimental data for nuclei in the region close to  $^{90}\text{Zr}$  levels schemes and excited states lifetimes were obtained, these results to be subsequently theoretically interpreted and discussed in the next stage of the project.*

*We mention that 1 scientific article was published in the ISI journal Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A and 2 oral communications at international conferences were made.*

### *3. Results obtained in 2017:*

In order to understand the obtained results from a theoretical point of view, a series of shell model calculations were made. The  $^{91}\text{Zr}$  nucleus was interpreted in the frame of the J-J coupling scheme, by using the NuShellX@MSU shell model code and the *glekpn* model space. This model space was selected because it allows protonic excitations above the  $Z = 20$  shell closure:  $\pi f_{7/2}$ ,  $f_{5/2}$ ,  $p_{3/2}$ ,  $p_{1/2}$ ,  $g_{9/2}$ . For neutrons,  $N = 40$  and  $N = 70$  delimit the available orbitals:  $\nu g_{9/2}$ ,  $g_{7/2}$ ,  $d_{5/2}$ ,  $d_{3/2}$  și  $s_{1/2}$ . Because this diagonalization space is very large, all the theoretical calculations were made by imposing the following restrictions: the  $\pi f_{7/2}$  orbital (protons) have to remain completely full (occupied), while the  $\nu g_{9/2}$  orbital (neutrons) suffered two

restrictions – to be completely occupied in the first round of shell model calculations (noted with calculus 1), while for the second one (calculus 2) to be occupied by at least 9 neutrons. The effective interaction *glekpn* proved to correctly describe the succession of excited states in  $^{91}\text{Zr}$  and the spin and parity of the groundstate. The  $^{90}\text{Zr}$  nucleus was theoretically described using the same coupling scheme, the same space, and the same restrictions with the *glekpn* effective interaction. For the purpose of this study only the first excited states are of interest, the ones with spin and parities  $0^+$ ,  $2^+$  și  $3^-$ . All these excited states have dominant components and, although the restrictions that were used are similar with the ones presented in the case of  $^{91}\text{Zr}$  – the favoured neutronic partition was the one where the neutrons are coupled to a total spin and parity  $J_v = 0^+$ , with an occupancy factor for the  $g_{9/2}$  neutronic orbital equal to 10. As promoting a neutron from the  $g_{9/2}$  neutronic orbital to the  $d_{5/2}$  or the  $g_{7/2}$  neutronic orbital is not favoured, it is preferred to completely fill the orbital that determines  $N = 50$ . In general, the *glekpn* effective interaction has described the experimental observables in a satisfactory way. It correctly reproduced the energetic position of the excited states, the order of spin and parities in the level scheme and the lifetime of the  $3^-$  excited state. The ratio  $\lambda_{\text{TH}}(E3) / \lambda_{\text{Wu}}(E3) = 7.56$  Wu obtained theoretically, compared with the experimentally obtained value of 15.201 Wu, indicates, as it was expected, a small degree of collectivity that can be assigned to the degrees of freedom related to vibrations around the spherical shape.

*We mention that 5 scientific articles were published in the following ISI journals: Physical Review C, Physical Review Letters, Radiation Physics and Chemistry and Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A.*