

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-15-0576**

Zriedkavé jadrové procesy a vývoj metód na ich sledovanie

Zodpovedný riešiteľ **prof. RNDr. Pavel Povinec, DrSc.**

Príjemca **Univerzita Komenského v Bratislave - Fakulta matematiky, fyziky a informatiky**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Univerzita Komenského, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Laboratoire Souterraine de Modane, Modane, Francúzsko (experimenty NEMO-3 a SuperNEMO)

National Laboratory Gran Sasso, Assergi, Taliansko (experimenty CRESST a LEGEND)

Zahraničné univerzity: Viedeň, Neapol, Bordeaux, Muenster, Mníchov, ETH Zurich, Risoe (Denmark), Jyväskylä (Fínsko), Tucson (USA), Athens (USA), Laval (Kanada), Sophia University (Tokyo), Tsukuba (Japonsko), Kanezawa (Japonsko)

Zahraničné laboratóriá: High Energy Physics Inst. (Rakúska akadémia vied, Viedeň), Ústav jaderné fyziky (ČAV, Praha), CERN (Ženeva), Joint Inst. of Nuclear Research, Dubna (Rusko), Inst. Nuclear Physics (Poľská akadémia vied, Krakov), Inst. Nuclear Studies (MAV, Debrecín)

Univerzity a inštitúty zúčastňujúce sa experimentov SuperNEMO, CRESST a LEGEND (spolu okolo 150 pracovísk).

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

- 0 -

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Kapitoly v monografiách:

1. Povinec P.P., M. Eriksson, J. Scholten, M. Betti: Marine Radioactivity Analysis. In: 4th Edition Handbook of Radioactivity Analysis, Ed. M. Annunziata, Academic Press, New York, 770-832, 2012; 5th Edition Vol. 2, p. 316-392, 2020.
2. Ješkovský M., J. Kaizer, I. Kontul', G. Lujanienė, M. Mullerová, P. P. Povinec: Analysis of environmental radionuclides. In 5th Edition Handbook of Radioactivity Analysis, Ed. M. Annunziata, Academic Press, New York, p. 138-261, 2020.
3. Povinec P.P., K. Hirose: Radionuclides as Tracers of Ocean Currents. In: Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Ed. R.A. Meyers, Springer Nature, New York, p. 1-37, 2020, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_289-3.

Články:

Výskum dvojitej beta-premeny (top 10):

1. Arnold, R., ... P Povinec, et al., (NEMO-3 Collaboration). Search for Neutrinoless Quadruple- β Decay of Nd-150 with the NEMO-3 Detector. *Phys. Rev. Lett.* 119(2017)041801, doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.041801.
2. Alanssari M., ..., M. Ješkovský, ..., P. Povinec et al.: Single and double beta-decay Q values among the triplet ^{96}Zr , ^{96}Nb and ^{96}Mo . *Phys. Rev. Lett.* 116(2016)072501.
3. Arnold, R.,..., R. Breier, ...,V. Palušová,...,P. Povinec, P. et al. Search for the double-beta decay of ^{82}Se to the excited states of ^{82}Kr with NEMO-3. *Nuclear Physics A* 996 (2020) 121701, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.121701>.
4. Arnold, R.,..., R. Breier, ...,V. Palušová,...,P. Povinec, P. et al. ^{100}Mo two-neutrino double beta decay in NEMO-3. *Eur. Phys. J. C* 79(2019)440, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6948-4>.
5. Arnold, R.,..., Povinec, P. P. et al.: Final results on ^{82}Se double beta decay to the ground state of ^{82}Kr from the NEMO-3 experiment. *Eur. Phys. J. C.* 78 (2018)1-15, Art. No. 821.
6. Arnold, R.... P Povinec et al., (NEMO-3 Collaboration). Measurement of the $2\nu\beta\beta$ decay half-life and search for the $0\nu\beta\beta$ decay of Cd-116 with the NEMO-3 detector. *Physical Review D* 95(2017) 012007. doi.org/10.1103/PhysRevD.95.012007.
7. Arnold, R., ..., P. Povinec et al. (NEMO-3 Collaboration). Results of the search for neutrinoless double beta-decay in Mo-100 with the NEMO-3 experiment. *Phys. Rev. D* 92, 2015, 072011.
8. Arnold, R., ..., Povinec P.P. et al.: Measurement of the $2\nu\beta\beta$ decay half-life of Nd-150 and a search for $0\nu\beta\beta$ decay processes with the full exposure from the NEMO-3 detector. *Phys. Rev. D* 94(2016)072003.
9. Arnold, R., ..., Povinec P.P. et al.: Measurement of the double-beta decay half-life and search for the neutrinoless double-beta decay of Ca-48 with the NEMO-3 detector. *Phys. Rev. D* 93, 112008, 2016.
10. Ješkovský, M.; Frekers, D.; Kováčik, A.; P.P. Povinec, P. Puppe, J. Staníček, I. Sýkora, F. Šimkovic, J.H. Thies. A search for double-electron capture of Se-74 to excited levels using coincidence/anticoincidence gamma-ray spectrometry. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 795(2015)268-275.

Budovanie experimentov SuperNEMO a LEGEND:

1. Povinec P.P.: Background constrains of the SuperNEMO experiment for neutrinoless double beta-decay searches. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 845(2017)398-403. doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.104.
2. Barabash, A.S.,..., K Holý,...,P Povinec et al. The BiPo-3 detector for the measurement of ultra low natural radioactivities of thin materials. *Journal of Instrumentation* 12, 06, 2017, P06002.
3. Barabash, A.S., ..., K Holý, ..., P Povinec et al. Calorimeter development for the SuperNEMO double beta decay experiment. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A:* 868(2017)98-108. doi.org/10.1016/j.nima.2017.06.044
4. P Loaiza, P., ..., K Holý, ..., P Povinec et al. The BiPo-3 detector. *Appl. Rad. Isot.* 123(2017)54-59. doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.01.021.
5. Rakhimov, A.V.,...,R. Breier, ...,K. Holý, ..., V. Palušová, ..., P. Povinec et al. Development of methods for preparation of radiopure ^{82}Se source for SuperNEMO neutrinoless double beta decay experiment. *Radiochimica Acta*, 108(2020)87–97, <https://doi.org/10.1515/ract-2019-3129>.
6. Arnold, R.,..., R. Breier, ... K. Holý, ...J. Kaizer, ..., V. Palušová,... P. Povinec, P. et al. Measurement of the distribution of ^{207}Bi depositions on radioactive calibration sources for the SuperNEMO neutrinoless double-beta decay detector. *Journal of Instrumentation* (v tlačí).
7. Abgrall, A., ...R. Breier, ... M. Ješkovský, J. Jochum, H. T. Johansson, D. Judson, M. Junker, J. Kaizer, ..., I. Kontul, ... P. P. Povinec, ... J. Zeman et al.: The large enriched germanium experiment for neutrinoless double beta decay (LEGEND). *AIP Conf. Proc.* 1894(2017)020027, doi.org/10.1063/1.5007652.
8. Abgrall, N.,..., R. Breier, ...M. Ješkovský,.. J. Kaizer,.. I. Kontul,... P.P. Povinec,... J. Zeman et al.: The Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay (LEGEND). *ArXiv:1709.01980 [phys.ins-det]*, 2020.

Výskum tmavej hmoty:

1. Abdelhameed, A.H.,...,R. Breier, ...,M. Ješkovský, J. Kaizer, ...,V. Palušová, L.,..., P.

- Povinec, ... and J. Zeman: Geant4-based electromagnetic background model for the CRESST dark matter experiment. *Eur. Phys. J. C* 79 (2019) 881, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7385-0>.
2. Kluck H., ... R. Breier, ... M. Ješkovský, J. Kaizer, ...V. Palušová, ...P. Povinec,... J. Zeman: Latest results of CRESST-III's search for sub-GeV/c² dark matter. *Journal of Physics C* 1468 (2020) 012038, doi:10.1088/1742- 6596/1468/1/012038.
 3. Mancuso M.,...R. Breier, ... M. Ješkovský, J. Kaizer, ..., V. Palušová, ... P. Povinec, ... J. Zeman: Searches for Light Dark Matter with the CRESST-III Experiment. *J. Low Temp. Phys.* 199(2020)510–518, <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02343-3>.
 4. Abdelhameed, A.H., ...R. Breier, ..., M. Jeskovsky, J. Kaizer, ..., V. Palušová, ... P. Povinec, ... J. Zeman: Cryogenic characterization of a LiAlO₂ crystal and new results on spin-dependent dark matter interactions with ordinary matter. *European Physical Journal C* *Eur. Phys. J. C* (2020) 80:834 <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8329-4>.
 5. Bertoldo E., ..., R. Breier,..., M. Ješkovsky, J. Kaizer, ...,V. Palušová, ...,P. Povinec, ..., J. Zeman: Lithium-Containing Crystals for Light Dark Matter Search Experiments. *J. Low Temp. Phys.* (2020), <https://doi.org/10.1007/s10909-019-02287-3>.
- Vývoj rádioanalytických metod (top 10):
1. Povinec P.P.: Ultra-sensitive radionuclide analyses: new frontiers in radioanalytics. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 322(2019)1247–1255, <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06707-2>.
 2. Povinec P.P.: New ultra-sensitive radioanalytical technologies for new science (Hevesy lecture). *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 316(2018)893-931.
 3. Povinec, P.P.: Developments in radioanalytics: from Geiger counters to single atom counting. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 318(2018)1573-1585.
 4. Povinec P.P.: Analysis of radionuclides at ultra-low levels: A comparison of low and high-energy mass spectrometry with gamma-spectrometry for radiopurity measurements. *Appl. Rad. Isot.* 126(2017)26-30.
 5. Kaizer J., S. Nisi, P. P. Povinec: Radiopurity measurements of aluminum, copper and selenium materials for underground experiments and mass spectrometry development. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 322 (2019) 1447–1454.
 6. Povinec, P.P., Benedik, L., Breier, R. Ješkovský, M., Kaizer, J., Kamenik, J., Kochetov, O., Kučera, J., Loaiza, P. Nisi, S., Palušová, V., Piquemal, F.: Ultra-sensitive radioanalytical technologies for underground physics experiments. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 318(2018)677-684.
 7. Bonin M., Lariviere D., Povinec, P.P. Detection of radium at the attogram per gram level in copper by inductively coupled plasma mass spectrometry after cation-exchange chromatography. *Anal. Methods* 12(2020)2272.
 8. Pánik, J., M. Ješkovský, J. Kaizer, P. Steier, J. Zeman, P.P. Povinec: Investigation of suitable targets for accelerator mass spectrometry of ²⁶Al. *Nuc. Instrum. Meth. Phys. Res. B* 438 (2019) 101-106, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.07.013>
 9. Kaizer, J. Dulanská, S., Horváthová, B., Ješkovský, M., Povinec, P. P.: Development of separation procedures for determination of uranium and thorium in the Se-82 source of the SuperNEMO experiment: first steps. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 318 (2018) 2321-2327.
 10. Kaizer J., M. Jeskovsky, J. Panik, J. Zeman, S. Dulanská, B. Horváthová, P. P. Povinec: Tracing of radiocesium extraction from waters and uranium content in liquid samples by particle induced X-ray emission (PIXE). *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 318(2018)591–597. doi.org/10.1007/s10967-018-6157-x.
- Monte Carlo simulácie:
1. Palušová V., R. Breier, E. Chauveau, F. Piquemal, P.P. Povinec: Natural radionuclides as background sources in the Modane underground laboratory. *J. Environ. Radioact.* 216(2020)106185. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106185>.
 2. Breier, R., Masarik, J., Palušová, V., Povinec, P.P. Monte-Carlo calculation of production rates of cosmogenic radionuclides in a HPGe detector operating in the Modane underground laboratory. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 978 (2020)164355.
 3. Breier, R., V. Brudanin, P. Loiaza, F. Piquemal, P. P. Povinec, E. Rukhadze, N. Rukhadze: Environmental radionuclides as contaminants of HPGe gamma-rayspectrometers: Monte Carlo simulations for Modane underground laboratory. *J. Environ. Radioact.* 190-191(2018)134-140.
 4. Baginová M., P. Vojtyla, P.P. Povinec. The neutron component of background of an HPGe detector operating in a surface laboratory. *Appl. Rad. Isot.* 166(2020)109422,

<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109422>.

5. Palušová, V., Breier, R., Povinec, P. P.: Monte Carlo simulation of environmental background sources of a HPGe detector operating in underground laboratory. J. Radioanal. Nucl. Chemistry 318(2018)2329-2334.

6. Ješkovec M., A. Javorník, R. Breier, J. Slučiak, P. P. Povinec: Experimental and Monte Carlo determination of HPGe detector efficiency. J. Radioanal. Nucl. Chem. 322(2019)1863–1869 <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06856-4>.

7. Breier R., Laubenstein, M., Povinec, P.P: Monte Carlo simulation of background characteristics of a HPGe detector operating underground in the Gran Sasso National Laboratory. Appl. Rad. Isot. 126(2017)188-190.

8. Breier, R., Y. Hamajima, P. P. Povinec: Simulations of background characteristics of HPGe detectors operating underground using the Monte Carlo method. J. Radioanal. Nucl. Chem. 307(2016)1957–1960.

Monografie a kapitoly v monografiách v tlači:

1. Povinec P.P., Hirose K., Aoyama M., Tateda Y.: Fukushima Accident - 10 years after. Elsevier, 2021 (v tlači).

4. Hong G.H., Povinec P.P.: The Oceans – Formation and Global Climate Change. The Elsevier Encyclopedia on Nuclear Energy, Edit. E. Greenspan, Elsevier (v tlači).

5. Hong G.H., Povinec P.P.: The Oceans - Implications of Manmade Radiation. The Elsevier Encyclopedia on Nuclear Energy, Edit. E. Greenspan, Elsevier (v tlači).

Pozvané prednášky (P. Povinec):

1. Hevesy Medal Award Lecture : New ultra-sensitive radioanalytical technologies for new science. 6th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry APSORC17 (17-22/9, 2017, Jeju, South Korea)

2. Opening Lecture : Ultra-sensitive radionuclide analyses: New frontiers in radioanalytics. 2nd Intern. Conf. on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (10–15/4, 2019, Budapest).

3. Invited Lecture: Ultra-sensitive spectrometric methods for environmental and space applications. 11th International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC XI) (May 2018, Kona, Hawaii, USA).

4. Invited Lecture : High-sensitive radionuclide analyses for radiopurity research. 17th RadChem Intern. Conf. (11-16/5, 2018 Mariánske Lázně).

5. Invited Lecture : Impact of Nuclear Power Plants on the Environment. 2nd International Conference on Radiocarbon in the Environment (June 2017, Debrecen).

4. Invited Lecture : Ultra-low level mass- and gamma-spectrometry synergy. The 99th Canadian Chemical Society Congress (5–8/6, 2016, Halifax, Canada).

5. Invited Lecture : Low-background gamma-spectrometry: Limits and applications. Intern. Conf. on Radioanalytical and Nuclear Chemistry (10–15/4, 2016, Budapest).

6. Invited Lecture : Environmental radioactivity after Fukushima - EU approach. Intern. Conf. on Food Radioactivity after the Fukushima Accident (21-25/10, 2015, Seoul, South Korea).

7. Invited Lecture : Searches for double electron capture decays. Intern. Conf. MEDEX2015 (2015, Prague).

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky, dosiahnuté pri riešení projektu sú dôležité pre ďalší rozvoj časticovej a jadrovej fyziky, najmä pre štúdium fyziky za Štandardným modelom. Hoci hlavný záujem vo výskume zriedkavých jadrových premien bol orientovaný na bezneutrinovú dvojitú beta-premenu ($0\nu\beta\beta$), najnovšie precízne výsledky z NEMO-3 experimentu pre polčasy dvojneutrinových dvojitých beta-premien ($2\nu\beta\beta$), našli uplatnenie v teoretických výskumoch fyziky za Štandardným modelom, charakterizovanými napr. narušením Lorentzovej a CPT symetrie, existenciou pravotočivých leptónových prúdov, atď. Tieto procesy môžu spôsobiť merateľné efekty aj v nízkoenergetickej oblasti, akou je $2\nu\beta\beta$ -premena jadier, s dopadom na nové teoretické výskumy. Porovnaním presných výsledkov z výskumu $2\nu\beta\beta$ -premeny s teoretickými výpočtami, možno napr. získať ohraňovania na Lorentzov operátor v teórii rozšíreného Štandardného modelu, ako aj pre ďalšie parametre tohto modelu.

Najväčšou výzvou pre $0\nu\beta\beta$ -premenu jadier zostáva objav, či neutrína sú Majoranovské (t.j. neutríno je totožné s antineutrínom, a teda neplatí zákon zachovania leptónového náboja), alebo sú Diracovské častice, a aká je kludová hmotnosť elektrónového neutrína. Obidva výsledky sú mimoriadne dôležité pre ďalší rozvoj fyziky za Štandardným modelom. Na

základe upresnených polčasov $2\nu\beta\beta$ -premien je možné spresňovať maticové elementy dôležité aj pre výskum $0\nu\beta\beta$ -premeny. Porovnaním teoretických výpočtov s experimentálnymi výsledkami sme preto tiež prispeli k bližšiemu určeniu mechanizmov $0\nu\beta\beta$ -premeny skúmaných jadier.

Vyvinuté ultrasenzitívne rádioanalytické technológie (urýchľovačová hmotnostná spektrometria, ICPMS, podzemné laboratóriá, nízkoopozadová gama-spektrometria) našli široké uplatnenie aj v iných vedných odboroch:

* Environmentálna fyzika a využitie rádionuklidov ako tracerov environmentálnych procesov.

* Výskum environmentálnej rádioaktivity a dopadu jadrových zariadení a jadrových havárií na životné prostredie.

* Využitie izotopov na výskum klimatických zmien a slnečnej aktivity pomocou prírodných archívov ako sú letokruhy stromov, sedimenty v moriach, ľadovce, a pod.

* Výskum zdrojov a charakteristík podzemných vôd, ich vulnerability a ochrany pred znečistením rádionuklidmi, ťažkými kovmi a organickými zlúčeninami.

* Výskum izotopového zloženia vôd a sedimentov oceánov, procesov vertikálneho a horizontálneho prúdenia a interakcií s atmosférou

Vyvinuté Monte Carlo modely charakterizujúce parametre detektorov našli využitie najmä na:

* zhodnotenie rádioaktívneho znečistenia detektorov

* zhodnotenie pozadia detektorov od kozmického žiarenia

* štúdium poškodenia elektronických súčiastok počas kozmických letov

* realizáciu nízkoopozadových detektorov v podzemných laboratóriách

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

(a) V rámci experimentu NEMO-3 sme prispeli: (i) k upresneniu polčasov $2\nu\beta\beta$ -premeny jadier ^{48}Ca , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , a ^{150}Nd v rozmedzí 10(E19)-10(E20) rokov a dosiahli sme najvyššie limity pre bezneutrínovú dvojitú beta premenu týchto jadier (>10(E21-22) rokov); (ii) k určeniu prvého limitu pre štvoritú bezneutrínovú beta-premenu jadra ^{150}Nd ($T(1/2) > 1.1\text{--}3.2 \times 10(\text{E}21)$ rokov); (iii) k určeniu prvého limitu pre možnú periodicitu v modulácii polčasu $2\nu\beta\beta$ -premeny jadra ^{82}Se , ktorá sa nepozorovala s amplitúdou väčšou ako 2.5% v rozsahu frekvencií od 0,33225 y^{-1} do 365,25 y^{-1} .

(b) Prispeli sme k budovaniu SuperNEMO detektora pre výskum $0\nu\beta\beta$ -premeny jadra ^{82}Se Monte Carlo simuláciami, návrhom tienenia a analýzou materiálov.

(c) V rámci experimentu CRESST sme prispeli k dosiahnutiu najlepšieho opublikovaného detekčného limitu pre WIMPs s hmotnosťou < 2 GeV/c² s účinným prierezom interakcie WIMPs s jadrami detektora < 2 x 10(E-3) pb.

(d) V rámci spolupráce s Univerzitou v Munsteri sme sa podieľali na experimente merania hmotností jadier pomocou iónových pascí na urýchľovači Univerzity v Jyväskylä, ktorého výsledkom je najpresnejšie určenie Q-hodnot tripletu jadier ^{96}Zr – ^{96}Nb – ^{96}Mo , ktorý má veľký význam pre výpočty maticových elementov.

(e) V našom nízkoopozadovom gama-laboratóriu sme namerali najlepší limit pre dvojitý elektrónový záchyt v jadre ^{74}Se ($T(1/2) > 1.5 \times 10(\text{E}19)$ rokov).

(f) Monte Carlo simuláciami pozadia detektorov a výskumom rádiočistoty materiálov sme prispeli sme k návrhu a budovaniu nového experimentu LEGEND pre výskum $0\nu\beta\beta$ -premeny jadra ^{76}Ge , ktorého 200 kg Ge verzia sa realizuje v podzemnom laboratóriu v Gran Sasso.

(g) Vybudovali sme na UK Centrum pre nukleárne a urýchľovačové technológie (CENTA), a prispeli sme k vývoju hmotnostnej spektrometrie (AMS, ICPMS) na určenie prímiesí ^{238}U a ^{232}Th v kritických konštrukčných materiáloch SuperNEMO, LEGEND a CRESST detektorov. Vyvinuli sme tiež nové metódy separácie U a Th a prípravy terčikov pre iónové zdroje. Dosiahli sme najlepšie publikované detekčné limity (5 nBq/g pre ^{232}Th a 10 nBq/g pre ^{238}U vo vzorkách medi).

(h) Pomocou Monte Carlo simulácií sme určili: (i) optimálne vrstvy tienenia SuperNEMO detektora z hľadiska dosiahnutia minimálneho pozadia; (ii) zložky jeho pozadia od elektrónov, neutrónov, gama-žiarenia a miónov; (iii) zložky pozadia CRESST detektorov od neutrónov, elektrónov a gama-žiarenia; (iv) zdroje pozadia podzemných Ge gama-spektrometrov od RA kontaminácie a od kozmického žiarenia, čo umožňuje správnym výberom materiálov až 100-násobne znížiť ich pozadie.

- (i) Vyvinuté ultrasenzitívne rádioanalytické technológie sme využili tiež v iných vedných odboroch (napr. environmentálna fyzika, rádioekológia, klimatológia, a pod.).
- (j) Precízne dáta z NEMO-3 experimentu pre $2\nu\beta\beta$ -premeny a nové experimenty pre výskum $0\nu\beta\beta$ -premien majú veľký význam pre fyziku za Štandardným modelom.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

- (a) In the framework of the NEMO-3 experiment we contributed: (i) to the determination of precise half-lives of $2\nu\beta\beta$ -decays of ^{48}Ca , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , a ^{150}Nd in the range of $10(\text{E}19)$ - $10(\text{E}20)$ years, and got the best limits for $0\nu\beta\beta$ -decay of these nuclei ($>10(\text{E}21-22)$ years); to the determination of the first limit of the quadruple zero neutrino double beta-decay of ^{150}Nd ($T(1/2) > 1.1-3.2 \times 10(\text{E}21)$ years); to the determination of the first limit in possible periodicity in the modulation of the half-life of $2\nu\beta\beta$ -decay of ^{82}Se , showing no evidence of modulations with an amplitude above 2.5% in the frequency range of 0,33225 y⁻¹ do 365,25 y⁻¹.
- (b) We contributed to the development of the SuperNEMO detector for investigations of $0\nu\beta\beta$ -decay of ^{82}Se by Monte Carlo simulations, design of the external shielding, and radio purity analyses of materials.
- (c) In the framework of the CRESST experiment we contributed to the achievement of the best limit of WIMPs with mass $< 2 \text{ GeV}/c^2$ with cross section of interaction with detector nuclei $< 2 \times 10(\text{E}-3)$ pb.
- (d) In the framework of collaboration with University of Munster we took part in high precision measurements of masses of nuclei using ion trap technique at the University of Jyväskylä accelerator, resulting in the most precise Q-values of the triplet ^{96}Zr - ^{96}Nb - ^{96}Mo , important for calculations of nuclear matrix elements.
- (e) We got the best half-life limit published for the double electron capture in ^{74}Se ($T(1/2) > 1.5 \times 10(\text{E}19)$ years), which was measured in our laboratory.
- (f) We contributed with Monte Carlo simulations and radio purity measurements to the design and the development of the new LEGEND experiment for the investigation of the $0\nu\beta\beta$ -decay of ^{76}Ge , which 200 kg Ge version is under construction in the National Laboratory Gran Sasso.
- (g) We built at the Comenius University a Centre for Nuclear and Accelerator Technologies (CENTA), and contributed to the development of mass spectrometry methods (AMS, ICPMS) for determination of ^{238}U and ^{232}Th in construction materials of SuperNEMO, LEGEND and CRESST, and to the development of separation methods and preparation of targets for ion sources. We published the best detection limits for analysis of ^{232}Th (5 nBq/g) and ^{238}U (10 nBq/g) in copper,
- (h) Using Monte Carlo simulations we determined: (i) the optimum shielding layers of the SuperNEMO detector; (ii) its background components originating from electrons, neutrons, gamma-rays and muons; (iii) background components of the CRESST detectors from neutrons, electrons and gamma-rays; (iv) sources of background of underground Ge detectors from RA contamination and from cosmic rays, which after selection of materials may decrease background by factor of 100.
- (i) The developed ultrasensitive radioanalytical technologies we applied in other scientific fields (e.g. in environmental physics, radioecology, climatology, etc.).
- (j) High precision NEMO-3 data for $2\nu\beta\beta$ -decays, as well as development of experiments for $0\nu\beta\beta$ -decays play crucial role for the extension of the Standard Model.