

Abstrakt

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci projektu APVV-15-576 *Zriedkavé jadrové procesy a vývoj metód na ich sledovanie*. Predmetom štúdie boli interakcie neutrónov s HPGe detektorom uskutočnené experimentálne, ako aj prostredníctvom Monte Carlo simulácií s použitím simulačného programu GEANT4. Pružný a nepružný rozptyl rýchlych neutrónov, rovnako ako aj neutrónový záchyt na Ge jadrách boli zreteľne pozorovateľné. V nameranom γ -spektre boli dobre viditeľné píky, ktoré boli vyvolané nepružným rozptylom neutrónov na ^{70}Ge , ^{72}Ge , ^{73}Ge , ^{74}Ge a ^{76}Ge . Detekované boli aj píky viditeľné v dôsledku nepružného rozptylu neutrónov na jadrách olova a medi, vrátane dobre známeho píku ^{208}Pb o energii 2614.51 keV. GEANT4 simulácie ukázali, že nasimulované spektrum bolo v dobrej zhode s experimentálnym. Pozorované rozdiely medzi nasimulovaným a nameraným spektrom boli spôsobené vyššou intenzitou γ -žiarenia neutrónového zdroja, implementovanou fyzikou v programe GEANT4 a kontamináciou ^{241}Am -Be neutrónového zdroja.

Ďalšia časť štúdie bola zameraná na pozadie detektora vyvolaného neutrónmi. Výskum sa uskutočnil prostredníctvom skúmania interakcií neutrónov pochádzajúcich z kozmického žiarenia s HPGe detektorom. Detektor bol umiestnený v kryte a nachádzal sa na prízemí 3-poschodovej budovy. Štúdium sa uskutočnilo experimentálne a prostredníctvom Monte Carlo simulácií s použitím GEANT4 simulačného nástroja. Podrobná analýza nameraného pozadového γ -spektra ukázala, že mnohé γ -čiary viditeľné v spektre boli vyvolané neutrónmi. Väčšina detegovaného γ -žiarenia pochádzala z germánia, medi, olova a cínu. Časti detektora vyrobené zo železa a hliníka patrili medzi menej dôležité zdroje pozadia. Nepružný rozptyl a neutrónový záchyt boli najčastejšie sa vyskytujúce procesy neutrónových interakcií s detektorom a jeho tienением. V pozadovom spektre bola prítomná aj kontaminácia spôsobená prírodnými rádionuklidmi, a to ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{40}K a ^{208}Tl . Avšak, približne 35% z ^{208}Tl píku o energii 2614.51 keV vzniklo v dôsledku nepružného rozptylu neutrónov na ^{208}Pb jadrách. Experimentálne získané pozadie bolo porovnané s GEANT4 simuláciami, ktoré boli vytvorené bez a vrátane tieniacej vrstvy budovy. Výsledná integrálna početnosť nameraného spektra v energetickom rozsahu od 50 keV do 2875 keV bola $1.26 \pm 0.07 \text{ s}^{-1}$ a nasimulovaného spektra $1.25 \pm 0.13 \text{ s}^{-1}$, čo naznačuje dobrú zhodu simulácie s experimentom.

Následne bolo skúmané pozadie HPGe detektora namerané v podzemnom laboratóriu, a to analyticky a prostredníctvom Monte Carlo simulácií, opäť s použitím simulačného nástroja GEANT4. Identifikované boli jednotlivé príspevky rôznych zdrojov pozadia k experimentálnemu spektru. Jednalo sa o kontamináciu materiálu v detektore a v jeho okolí, neutróny produkované v (α, n) reakciách prebiehajúcich kvôli prítomnosti alfa rádionuklidov v betónových stenách a skalách laboratória, ako aj v dôsledku spontánneho štiepenia ^{238}U , a kozmické žiarenie produkujúce neutróny. Simulácie zahrňujúce kontamináciu materiálu boli v dobrej zhode s experimentálnym spektrom. Zároveň boli nasimulované individuálne spektrá vyvolané neutrónmi a kozmickým žiarením. Kontaminácia častí detektora a stien laboratória členmi ^{238}U a ^{232}Th rozpadového radu, a ^{40}K tvorí takmer 94% kontinua experimentálneho spektra. V súlade so simuláciami je príspevok miónových interakcií k experimentálnemu γ -spektrom menší ako 1%, pričom sa potvrdilo, že pozadové spektrá vyvolané kozmickým žiarením sú o tri rády nižšie ako experimentálne spektrá. Porovnanie integrálnej početnosti experimentálneho spektra a nasimulovaného spektra vyvolaného neutrónmi ukázalo, že asi 6% kontinua nameraného pozadia je tvorených neutrónovými reakciami. Rýchle neutróny (asi 65%) prispievali k pozadiu viac ako termálne neutróny. Napriek tomu, že neutróny tvoria len asi 6% celkového pozadia, prispievajú hlavne k oblasti kontinua pod 250 keV, čo je región očakávaného výskytu interakcií slabo interagujúcich masívnych častíc (WIMP) temnej hmoty. Neutróny zároveň interagujú s detektorom a tienением nepružným rozptylom a vyvolávajú tak neželané γ -žiarenie. Neutrónový záchyt, ako aj pružný a nepružný rozptyl boli nasimulované

samostatne. Ukázalo sa, že nepružný rozptyl je hlavným prispievateľom k spektru vyvolaného neutrónmi. Efekt neutrónov na pozadie HPGe detektora prevádzkovaného v podzemnom laboratóriu, ako je Obelix, sa prejavuje najmä príspevkom ku kontinuu do 1 MeV, a to obzvlášť v nižšej časti do 500 keV. Neutróny sú teda dôležitým pozadovým komponentom aj v hlbokých podzemných laboratóriách. Diskutovaná bola aj možná optimalizácia detektora.

Vzhľadom na zámer vybudovať na Slovensku podzemné laboratórium pre astrofyzikálne a environmentálne štúdium rádioaktivity, boli vypočítané miónové vertikálne spektrálne toky pre hĺbky 50 m w.e. a 1000 m w.e. Nasimulované bolo aj miónmi vyvolané pozadie HPGe detektora s relatívnou účinnosťou 100% v oboch hĺbkach. Kompletná geometria HPGe detektora bola zahrnutá do GEANT4 simulácie vrátane tienenia. Gamma čiary viditeľné v nasimulovanom pozadovom spektre, ktoré pochádzajú z neutrónových interakcií s detektorom a jeho tienením, boli analyzované a vyhodnotené. Ukázalo sa, že v pozadovom spektre nasimulovanom pre podzemné laboratórium v hĺbke 50 m w.e. prevládajú píky medi. V pozadovom spektre nasimulovanom pre podzemné laboratórium v hĺbke 1000 m w.e. prevládajú píky germánia do energie 1500 keV, a od 1500 keV dominujú opäť píky medi. Pozadové spektrá boli porovnané a zistilo sa, že hĺbka 1000 m w.e. je dostatočná nato, aby znížila pozadie od miónov o 5 rádov. Množstvo píkov v pozadovom spektre pochádzajúcich od neutrónových interakcií je väčšie v hĺbke 50 m w.e. než v hĺbke 1000 m w.e., tak ako sa očakávalo. Porovnali sa aj početnosti jednotlivých píkov v oboch spektrách. Na základe zistení sa použitie medi ako konštrukčného materiálu pre tienenie HPGe detektora umiestneného v podzemí neodporúča, z hľadiska pozadia vyvolaného kozmickým žiarením. Efekt prírodných rádionuklidov v plánovanom podzemnom laboratóriu na Slovensku bol odhadnutý. Príspevok prírodných rádionuklidov ku kontinuu pozadového spektra HPGe detektora s relatívnou účinnosťou 100% by tvoril približne 40% v hĺbke 1000 m w.e. a 10% v hĺbke 50 m w.e. Výber ultračistého materiálu pri výrobe detektora a tienenia je dôležitý faktor a odporúča sa s dôrazom na minimalizovanie vplyvu γ -žiarenia od prírodných rádionuklidov na pozadie detektora. Detekčný limit pre ^{137}Cs v hypotetickej vzorke bol stanovený pre obe uvažované hĺbky. V laboratóriu umiestnenom v hĺbke 50 m w.e. by bol detekčný limit 7.3 mBq a v hĺbke 1000 m w.e. by to bolo 0.54 mBq. Z uvedených hodnôt vyplýva, že umiestnením detektora v hĺbke 1000 m w.e. by sa dal detekčný limit znížiť najviac o jeden rád v porovnaní s hĺbkou 50 m w.e.