

Jel-háttér arány optimalása termikusneutron-detektorban

Ph.D. Tézisfüzet

Dian Eszter

Témavezető: Dr. Zagyvai Péter

Konzulens: Prof. Dr. Richard Hall-Wilton

Dr. Czifrus Szabolcs

MTA Energiatudományi Kutatóközpont
Környezetfizikai Laboratórium

European Spallation Source ESS ERIC

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Nukleáris Technikai Intézet

2019

Bevezetés

A modern kutatások legalapvetőbb eszközei közé tartoznak az anyagvizsgálati nagyberendezések, és az egyik igen széles körben alkalmazott módszer a neutronszóráson alapuló anyagvizsgálat. E tudományterület új zászlóshajója lesz a jelenleg épülő Európai Neutronkutató Központ (ESS, European Spallation Source ERIC), melyet 17 európai tagország együttműködésével építenek Lundban, Svédországban. Az összefogás célja, hogy az ESS legyen a világ vezető neutronforrása az évszázad második negyedében [Peggs, 2013]. Az ESS lesz a világ legnagyobb hozamú neutronforrása, mely a jelenlegi legkorszerűbb mérőberendezések teljesítményét felülmúló kísérleteket tesz lehetővé. Az ESS egy egyedi, ún. hosszúpulzusú spallációs neutronforrás lesz 5 MW termikus teljesítménnyel. Ezt a teljesítményt 2 GeV energiájú protonok adják le volfrám spallációs céltárgyban, és a keletkezett neutronokat az innovatív ún. „pillangó moderátor” lassítja. E tulajdonságainak köszönhető az ESS eddig példátlan neutronhozama, ami többek között lehetővé teszi kisebb minták, vagy a fázistér szélesebb tartományának vizsgálatát. Ez a jelentős neutronhozam, és a jelenleginél jobb idő- és helyfelbontású, nagyobb érzékeny felületű, stb. kísérleti berendezések iránti igény ugyanakkor komoly kihívást jelentenek a mérőállomások tervezésekor, különös tekintettel a neutrondetektorokra.

A szórás-kísérleteknél alkalmazott detektorok közül hagyományosan az egyik legelterjedtebb detektor a ^3He gázzal töltött proporcionális számláló. Ennek okai a ^3He előnyös neutron abszorpciós és kémiai tulajdonságai (nem toxikus, inert gáz), a technika egyszerűsége, - vagyis hogy a töltőgáz egyben neutron konverter is -, valamint a ^3He elérhetősége és megfizethető ára. A jelenleg piacon levő ^3He gyakorlatilag a nukleáris fegyverkezés melléktermékeként keletkezik: a rakétákhoz használt trícium 12,33 éves felezési idővel ^3He -má bomlik, amitől rendszeresen meg kell tisztítani a tríciumot. Ebből kifolyólag a világ két fő ^3He ellátója az Amerikai Egyesült Államot és Oroszország. A ^3He árát, melléktermék mivoltából kifolyólag sokáig mesterségesen alacsonyan tartották. 9/11 után azonban az Egyesült Államot kormánya, belbiztonságot növelő intézkedései keretében sugármérő monitorokat, elsősorban neutrondetektorokat telepített az állam- és államközi határookra. A hirtelen megnövekedett kereslet hatására a ^3He literenkénti ára több mint egy nagyságrendet emelkedett, ez az ún. ^3He -krízis [Shea, 2010]. Ez a jelenség kihatott az egész neutronos közösségre és az épülő ESS-re is. Közös megegyezés született alternatív detektortechnológiák használatáról mindazon alkalmazásoknál, ahol ez ésszerűen, a kísérletek tudományos értékének jelentős csökkenése nélkül megvalósítható.

Az egyik legígéretesebb alternatív megoldás a szilárd ^{10}B -alapú neutrondetektálás, melyet többnyire Ar/CO₂ töltőgázos detektorokkal valósítanak meg [Sauli, 1977]. Ezen detektorok teljesítőképessége nagymértékben függ az alkalmazott neutronkonvertertől: a $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reakcióban keletkező konverziós részecskéknek ki kell lépni a konverter rétegből, és el kell érniük a detektor érzékeny térfogatát. Ebből adódóan a tipikus, hatékony konverter-vastagság 1-2 μm termikus és gyors neutronokra, így a ^3He -csövekével összemérhető detektálási határfok eléréséhez több konverter réteget célszerű alkalmazni, valamilyen egyszerű, ismétlődő szerkezetben.

Ilyen detektorok fejlesztése folyik jelenleg is számos kutatóintézet, köztük az ESS együttműködésében. A ^3He detektortechnológia kiváltása például a direkt geometriájú spektrométerek esetében az egyik legnagyobb kihívás, mivel ezek a berendezések nagy

felületű detektorokat igényelnek, többnyire nagy töltőgáz térfogattal. Eddig két direkt geometriájú spektrométer építéséről született végleges döntés az ESS-ben, ezek a CSPEC (Cold Chopper Spectrometer) és T-REX (Bispectral Chopper Spectrometer) berendezések. Mindkét berendezéshez az Institut Laue-Langevinben (ILL) feltalált, jelenleg az ILL és az ESS által közösen fejlesztett ún. Multi-Grid detektor [Andersen, 2012] került kiválasztásra. Ez a detektor egy szilárd, ^{10}B -ral dúsított B_4C -konverteres, Ar/CO_2 gázzal töltött proporcionális kamra.

A Multi-Grid detektor alapegysége a rács, egy alumínium keret, ebben helyezik el a mindkét oldalukon néhány μm vastag B_4C konverter-réteggel borított, alumínium lemezeket. A rácsok oszlopokba, azok pedig modulokba rendeződnek, ahol minden modulnak saját, néhány mm vastag alumínium háza van. A teljes detektor rendszer ezekből a modulokból épül fel, tipikusan egy ~ 3 m magas hengerfal, 3-4 m sugárral, ami vízszintes síkban 180° -ot fed le. Mivel a direkt geometriájú spektrométerek rugalmatlan szórás alapuló berendezések, a várható jel néhány nagyságrenddel kisebb, mint rugalmas szórás esetén. Emiatt e berendezések tervezésénél meghatározó szempont a kiváló jel-háttér arány.

Az új anyagok és struktúrák alkalmazása nagy neutronfluxusú térben azonban új kérdéseket és problémákat vethet fel. Az argon neutronaktivációja nukleáris létesítményekben jól ismert jelenség, és ez alapján az egyes detektorokban alkalmazandó nagymennyiségű Ar/CO_2 töltőgáz (70-90% argon-tartalommal) és az alumínium detektor-komponensek lehetséges felaktiválódását is célszerű figyelembe venni a tervezés során. A legtöbb berendezés az ESS-ben termikus vagy hideg neutronokkal fog üzemelni, ami nagy átlagos reakciósebességet jelent a neutronaktivációra nézve. Emiatt pedig lehetséges, hogy az argon és az egyéb detektorkomponensek felaktiválódása számottevő lesz az aktivitás-kibocsátás, illetve a mérőcsarnokbeli munkahelyi sugárterhelés szempontjából. Mindemellett a kísérő prompt és bomlási gamma-sugárzás megnövelheti a tervezett kísérletekben a mérési háttérrel.

A mérési háttér további jelentős komponense a szórtneutron-háttér. Az új, nagyfelületű detektoroknak általában összetett belső szerkezete van, többnyire a konverter rétegeket hordozó alumínium felületek miatt, és az ezeken való szóródás nagymennyiségű alumínium esetén számottevő, a detektorban indukált 'belső' (intrinsic) szórtneutron-háttérrel eredményezhet. Ez a jelenség különösen fontos lehet a Multi-Grid detektorban, ahol egy detektorrendszer alumíniumtartalma meghaladja a 3 tonnát. A detektor összetett, rácsos felépítése miatt nagyon sok a potenciális szórófelület, ami hozzájárulhat a kialakuló háttérhez. Az elrendezés ugyanakkor lehetőséget biztosít e háttér hatékony csökkentésére belső detektorárnyékolás alkalmazásával. A neutron-szimulációs kódok közelmúltban bekövetkezett ugrásszerű fejlődésének köszönhetően ez a nehezen vizsgálható belső szórtneutron-háttér megbecsülhetővé vált realisztikus Monte Carlo szimulációval.

Célkitűzések

A jelen kutatással hozzájárultam a szilárd bórkarbid-konverteres Multi-Grid detektor fejlesztéséhez, ennek keretében a dolgozatban bemutatott munka célja a detektor jel-háttér arányának optimalizálása, illetve a detektorban neutronok által keltett sugárzási háttér csökkentése korszerű belső detektorárnyékolás fejlesztésével. Ehhez meghatároztam

a neutronok által indukált gamma- és szórtneutron-háttérrel a Multi-Grid detektorban, valamint a keltett aktivitást, Monte Carlo szimulációval megkülönböztetve az egyes háttérforrásokat.

Míg a detektoron belüli neutronszórás erősen geometriafüggő, a felaktiválódás és a neutronok keltette gamma sugárzás általános probléma minden Ar/CO₂ töltőgázos neutrontetektornál. Ezért egy egyszerűsített, általános detektormodellben vizsgáltam a neutronaktivációt, hogy jól skálázható, konzervatív becslést adjak a töltőgázból és az alumínium detektorházból származó prompt- és bomlási-gamma hozamra az ESS tipikus neutron energiatartományában (0.8–227 meV, azaz 0.6–10.0 Å). A kapott eredmények felhasználásra kerültek az ESS sugárvédelmének tervezésénél, például a lehetséges foglalkozási dózisok meghatározásánál. Vizsgáltam továbbá a detektorban keletkező, neutron-indukált gamma-háttérnek az elvégzendő mérésekre gyakorolt várható hatását. Ehhez meghatároztam a detektor neutron és gamma válaszáinak arányát. Meghatároztam továbbá a neutronaktivációból származó aktivitást a töltőgázban és az alumínium házban. A kapott eredmények adatot szolgáltattak az ESS-nek az aktivitás-kibocsátás (például a gázátáramoltatásos módban üzemeltetett detektorok ⁴¹A kibocsátása) és a radioaktív hulladék-kezelés tervezéséhez is. A vizsgálatokat MCNP szimulációval és analitikus számításokkal végeztem.

Disszertációm másik fő területe a detektorban keletkező szórtneutron-háttér, és annak mért jelre gyakorolt hatásának vizsgálata Monte Carlo szimulációval, valamint a háttér csökkentése kombinált belső detektorárnyékolás alkalmazásával. Vizsgálataimat a korábban bemutatott Multi-Grid detektorra végeztem Geant4 szimulációval. Szimulációimban több szórtneutron-forrást is figyelembe vettem, így az alumínium detektorházban, a töltőgázban vagy a detektorházban való szóródást is, különös tekintettel a detektor belépő ablakára. A belépő ablak egy különösen kényes elem, jól ismert problémákkal, hiszen a vákuum-interfész részeként mechanikai funkciókat is ellát. A detektor eredetű szórtneutron-háttér komponenseit és azok hatását összehasonlítottam a kísérleti berendezés egyéb komponensein való neutronszórásból származó háttérrel és annak hatásával (például a mintakörnyezeten vagy a mérőkamra töltőgázán való szóródás). A szimulációk során figyelembe vettem a rugalmas és rugalmatlan neutronszórás, az alumínium kristályszerkezettel való kölcsönhatást, beleértve a Bragg-diffrakciót és a rugalmatlan/inkohérens folyamatokat. Így a dolgozat második felének a célja a) részletes, parametrizált, rugalmas és valóság-hű Multi-Grid detektormodell kifejlesztése és validálása, b) detektor eredetű szórtneutron-források elkülönítése és számszerűsítése a kifejlesztett modellel, és c) a Multi-Grid detektor jel-háttér arányának optimalizálása belső detektorárnyékolással való háttércsökkentéssel. Végül mindezen lépések teljesítésével egy új, átfogó detektoroptimalizációs módszer bemutatása és első alkalmazása a neutrontetektorok fejlesztésében.

Módszertan

Az aktivációs szimulációkat és a neutronok által indukált gamma-háttér meghatározását MCNP6.1 programmal végeztem, továbbá a szimulált eredményeket összevettem analitikus számításokkal is. Az Ar/CO₂ töltőgázos detektort egy 5 mm vastag Al5754 alumínium házzal körülvett 10 cm x 10 cm x 10 cm élhosszúságú kockával

közelítettem. A szimulációban a detektormodellt $0,82\text{--}227,23\text{ meV}$ ($10\text{--}0,6\text{ \AA}$) energiatartományba eső monoenergiás neutronnyalábokkal sugáraztam be. A neutronokat párhuzamosan indítottam egy $8,5\text{ cm}$ sugarú körlapról, 50 cm -re a detektortól. A kapott aktivitást és gamma hozamot $10^4\text{ n/cm}^2/\text{s}$ beeső fluxushoz skáláztam, mely konzervatív becslés az ESS standard üzemi állapotára.

A szórtneutron-háttér vizsgálatát Geant4 szimulációkkal végeztem a közelmúltban fejlesztett NXSG4 és NCrystal kiegészítő csomagok használatával, melyek lehetővé teszik a neutron és kristályos anyagok, ez esetben alumínium kölcsönhatásának modellezését, beleértve a Bragg-diffrakciót és a rugalmatlan/koherens folyamatokat. A szimulációkat az ESS Detektor Csoport által fejlesztett szimulációs keretrendszerben végeztem (ESS Coding Framework [Kanaki, 2018]). Implementáltam a Multi-Grid detektor részletes, valóság-hű és rugalmasan alakítható modelljét, majd az ILL IN6 és az SNS CNCS berendezéseinél korábban elvégzett demonstrátor tesztekben kapott mért eredmények (repülési idő, repülési út, energia-transzfer, stb.) reprodukálásával validáltam azt. A szimulációkhoz három specifikus detektormodellt származtattam az általános Multi-Grid detektormodellből: a validációs kísérletek két prototípusát, és az ESS CSPEC berendezéséhez tervezett változatot. Meghatároztam és elkülönítettem a szórtneutron-háttér komponenseit a CNCS detektormodellel, majd vizsgáltam ezeknek a jel-háttér arányra gyakorolt hatását a CSPEC modellben. A jel-háttér arány belső detektorárnyékolással való optimalálásához különböző árnyékolás típusokban alkalmaztam egy fiktív ideális totál-abszorbenst, illetve gyakori neutron-árnyékoló anyagokat, mint a B_4C , Cd , LiF és Gd_2O_3 . Ily módon meghatároztam az egyes árnyékolás típusok háttércsökkentő kapacitását, majd a különböző abszorbensek jel-háttér arányra gyakorolt hatását a vizsgált árnyékolás típusoknál.

Új tudományos eredmények

1. Kidolgoztam egy általános MCNP modellt neutronaktiváció szimulációjához Ar/CO_2 töltőgázos, alumínium házas detektorban. Meghatároztam a neutron-indukált aktivitást, prompt- és bomlási-gamma hozamot $0,8\text{--}227\text{ meV}$ tartományon monoenergiás neutronokkal besugarazott, $80/20$ térfogat %-os Ar/CO_2 -dal töltött A15457 alumíniumházas detektorra. Összeállítottam egy optimális hatáskeresztmetszetkönyvtár-listát, melyre a szimulált és analitikusan számolt eredmények megfelelő egyezést mutatnak gamma-spektrum, gamma hozam (maximum $5\text{--}10\%$ eltérés a főbb komponenseknél) és aktivitás (becsült hibahatáron belüli egyezés) tekintetében. Vizsgáltam az ^{40}Ar felaktiválódását a mért jelnél megjelenő gamma-háttér illetve aktivitás kibocsátás szempontjából. Megállapítottam, hogy a várhatóan naponta keletkező aktivitás Ar/CO_2 gáztöltésű detektorokban (mint például a direkt geometriájú spektrométerek nagyfelületű detektoraiban), $1,3 \cdot 10^6\text{ Bq/nap}$ (25 meV neutron energia mellett, $\sim 10^7\text{ cm}^3$ gáztérfogatra), ami 1 nap tárolással elhanyagolhatóra csökkenthető, figyelembe véve az ESS néhány GBq-es tervezett napi összaktivitás-kibocsátását. Meghatároztam továbbá a jel-háttér arányt a neutronaktivációt kísérő prompt- és bomlási- gamma háttérre. Ez az egész vizsgált energiatartományra $10^9\text{--}10^{10}$, vagyis

az Ar/CO₂ töltőgáz felaktiválódásából származó gamma-háttér elhanyagolható, annak további csökkentése nem szükséges. [P1]

2. Kifejlesztettem és implementáltam a szilárd, ¹⁰B-ben dúsított bórkarbid-konverteres, Ar/CO₂ töltőgázos Multi-Grid detektor részletes, valóság-hű és skálázható Geant4 modelljét. A modellt az ESS szimulációs keretrendszerében (ESS Coding Framework) készítettem el az NXSG4 és NCrystal csomagok alkalmazásával, melyek lehetővé teszik bizonyos kristályos anyagok modellezését, így a neutronabszorpció valamint a koherens és inkoherens szórás folyamatok egyaránt szerepeltek a szimulációkban. Ez a szórás modell első alkalmazása hidegneutron-szórás szimulációjában, ami lehetővé teszi a folytonos szórtneutron-háttér jelre gyakorolt hatásának meghatározást, még a látszólagos felbontás alatti tartományban is. A modellezett háttér 5–7 nagyságrenddel kisebb, mint a minden esetben jelen lévő rugalmatlan csúcs. Az **1. és 2. Tézis**ekben bemutatott modellek lehetővé teszik a nagyon alacsony szintű gamma- és szórtneutron-háttér hatásainak feltérképezését, ezáltal új lehetőséget nyitva a neutrontetektor-fejlesztés és jel-háttér arány optimalálás előtt. [P2]
3. A **2. Tézis**ben bemutatott általános, skálázható Multi-Grid detektormodellből kialakítottam két detektor prototípus Geant4 modelljét, egy az ILL IN6 berendezésén tesztelt hatoszlopos demonstrátorét, és egy az SNS CNCS berendezésén tesztelt kétszlopos detektorét. Ezek segítségével a kapott mért eredményekkel mind kvalitatívan (szórás profilok reprodukálásával) mind kvantitatívan validáltam a felépített detektormodellt. Ehhez reprodukáltam szimulációval az IN6 berendezésnél mért repülési idő spektrumokat és szórás jelenségeket 3,15, 3,87 és 44,87 meV neutron energiákon. Hibahatáron belül reprodukáltam továbbá a CNCS kísérletnél mért repülési idő, energia-transzfer és repülési út spektrumokat a rugalmas csúcs tartományában, illetve és jellegében a folytonos szórt háttérrel. Ezen felül a CNCS modellen számos, a 1,0–8,0 meV energiatartományon végzett mérésekben megjelenő, a detektortól vagy magától a berendezéstől származó neutronháttér-komponenst szimuláltam és különítettem el, így a detektorrácson, a mérőkamra töltőgázán vagy a mintakörnyezeten való szórást. [P2]
4. Tanulmányoztam a szórtneutron-háttér egyes komponenseinek a mért repülési idő, energiatranszfer és repülési út spektrumokon megjelenő hatásait a **3. Tézis**ben bemutatott kétszlopos Multi-Grid detektormodellen. Meghatároztam a különböző szórás komponensek (a detektorrácson vagy -házon való szórás, a mérőkamra Ar/CO₂ töltőgázán vagy a mintakörnyezeten való szórás, stb.) szórtneutron-háttérhez adott járulékát. Megállapítottam, hogy a detektorból származó járulék 10% az alumínium Bragg-él alatt és 60% fölötté. A detektor szórtneutron-háttére 0,1–0,2%-a a rugalmas csúcsnak a teljes vizsgált energiatartományon, és egyenlő mértékben származik a detektorrácstól és a háztól. A szórtneutron-háttér jelentős energiafüggést mutat, és a detektor-térfogattal skálázódik. Így ezeket a hatásokat mindenképpen figyelembe kell venni és optimalálni kell a teljes detektorra. [P2]

5. A **4. Tézis** alapján szimulációval meghatároztam az alumínium detektorház oldalfalai és a detektorablak szórtneutron-háttérhez adott járulékat különböző ablakvastagság és neutronenergiák mellett a 1,0–8,0 meV tartományban. Megállapítottam, hogy az alumínium Bragg-él alatti energiákon a detektorház és –rács járuléka s háttérhez elhanyagolható, 0,2–0,4%-a a rugalmas csúcshoz. A Bragg-él fölött a detektor teljes járuléka a rugalmas csúcs 1,7–4%-a. Megállapítottam továbbá, hogy realiztikus, 2–5 mm-es ablakvastagságoknál a teljes detektor járuléka 80–96%-a a detektorház falaitól és a detektorrácstól származik. Így tehát a detektorablak szórtneutron-háttérre gyakorolt hatása elhanyagolható, az ablak optimálható a mérnöki/műszaki követelményekre. **[P2ésP3]**
6. A **4. és 5. Tézisek** alapján felhasználtam a kifejlesztett, validált Multi-Grid modellt a belső detektorháttér csökkentésére az ESS-hez tervezett CSPEC (Cold Chopper Spectrometer) detektormodellben, két különböző módszerrel. Egyrészt mivel a konverter réteg tekinthető árnyékolásnak is, vizsgáltam a hosszanti alumínium lemezen alkalmazott konverter réteg detektálási hatásfokra és jel-háttér arányra gyakorolt hatását. Megmutattam, hogy 1 μm $^{10}\text{B}_4\text{C}$ alkalmazásával a hatásfok 8–19%-kal, míg a jel-háttér arány 8–14%-kal növelhető az 5,1–511 meV intervallumban. A berendezés költségeinek optimalizálását illetően a hozzáadott konverter-rétegek miatti mérsékelt költségnövekedés igazolható a jel-háttér arány növekedésével. A továbbiakban egy fiktív ideális totál-abszorbens alkalmazásával meghatároztam a különböző árnyékolás-típusoknak, úgymint a hátlapi árnyékolás, oldalfali árnyékolás és oszlopközi árnyékolás háttérsökkentő kapacitását. Megmutattam, hogy a leghatékonyabb a hátlapi árnyékolás, mely a neutronok 10–60%-át nyeli el 5,1 meV felett, majd az oldalfali árnyékolás, mely a neutronok 5–10%-át nyeli el a teljes vizsgált energiatartományon, míg az egyébként is legnehezebben telepíthető oszlopközi árnyékolás hatása minimális. Ezután hagyományos neutronárnyékoló anyagokat (B_4C , Cd, Gd_2O_3 és LiF) alkalmaztam mindegyik árnyékolástípusra és megállapítottam, hogy 1-1 mm B_4C vagy Cd hatása egyenértékű a totál-abszorbensével. Ezen anyagok és a három árnyékolástípus kombinációjának alkalmazásával a jel-háttér arány 50-106%-kal növelhető a teljes vizsgált 0,81–511 meV energia-intervallumban. **[P3]**

Irodalomjegyzék

- [Peggs, 2013] S. Peggs, et al., ESS Technical Design Report, ESS 2013-001, <http://esss.se/scientific-technical-documentation>(2013).
- [Shea, 2019] D.A. Shea and D. Morgan, The Helium-3 shortage: supply, demand, and options for congress. Tech. rep. R41419. Congressional Research Service, 2010.
- [Sauli, 1977] F. Sauli. “Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers”. CERN 77-09 (1977).

- [Andersen, 2012] K. Andersen et al., ¹⁰B multi-grid proportional gas counters for large area thermal neutron detectors” *Nucl. Instr. and Meth. A* **720** (2013), pp. 116-121. doi: 10.1016/j.nima.2012.12.021.
- [Kanaki, 2018] K. Kanaki et al., Simulation tools for detector and instrument design. *Physica B: Condensed Matter* **551** (2018) 386–389. doi: 10.1016/j.physb.2018.03.025
- [Galgóczi, 2018] G. Galgóczi et al., Investigation of neutron scattering in the Multi-Blade detector with Geant4 simulations. *JINST* **13** (2018) P12031

Az eredmények felhasználása

Jelen kutatás eredményei számos ESS-hez kötődő projektben kerültek felhasználásra. A kiszámolt gamma hozamok és az aktivitások felhasználásra kerültek az ESS sugárvédelmi és biztonsági tervezésénél. A Geant4 szimulációk folyamatosan szolgáltattak adatot az elmúlt 3 évben a Multi-Grid detektor fejlesztéséhez, például az esetleges többlet konverter rétegek alkalmazásának, a belépőablak vastagságának és a belső árnyékolás kialakításának kérdéseiben. Emellett a Multi-Grid detektormodell validációja szerves része az ESS Detektor Csoportban fejlesztett Geant4 alapú Keretrendszer validációjának [Kanaki, 2018]. Végül pedig az itt bemutatott új, részletes és kiterjedt Monte Carlo szimulációkon alapuló, átfogó detektoroptimalizációs módszert adaptálták más detektorokra is, például a szintén ESS-hez készülő Multi-Blade detektorra [Galgóczi, 2018].

Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- [P1]. E. Dian, K. Kanaki, R. J. Hall-Wilton, P. Zagyvai, Sz. Czifrus: Neutron activation and prompt gamma intensity in Ar/CO₂-filled neutron detectors at the European Spallation Source, *Applied Radiation and Isotopes* **128**, (2017) pp. 275-286, doi: 10.1016/j.apradiso.2017.06.003
- [P2]. E. Dian, K. Kanaki, R. J. Hall-Wilton, A. Khaplanov, T. Kittelmann, P. Zagyvai: Scattered neutron background in thermal neutron detectors, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, **A902** (2018) 173–183, doi: 10.1016/j.nima.2018.04.055
- [P3]. E. Dian, K. Kanaki, A. Khaplanov, T. Kittelmann, P. Zagyvai, R. Hall-Wilton: Suppression of intrinsic neutron background in the Multi-Grid detector, (2019) *JINST* **14** P01021, doi: /10.1088/1748-0221/14/01/P01021

További publikációk

- [P4]. E. Dian & R. Hall-Wilton, Input to ESS SSM (RP safety) application, 2016.
- [P5]. BrightnESS Deliverable Report: D4.5 – Simulation and Generic Multi-Grid design, doi: [10.17199/BRIGHTNESS.D4.5](https://doi.org/10.17199/BRIGHTNESS.D4.5)
- [P6]. E. Dian, K. Kanaki, R. Hall-Wilton, A. Khaplanov and T. Kittelmann: Shielding optimization study for ^{10}B -Based large area neutron detectors with detailed Geant4 model, *2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD)*, Strasbourg, 2016, pp. 1-3.
doi: 10.1109/NSSMIC.2016.8069784
- [P7]. K. Kanaki, XX. Cai, E. Dian, R. Hall-Wilton, A. Khaplanov, T. Kittelmann: *New simulation tools and reproduction of CNCS results using Geant4* (konferencia-előadás)
ICANSXII, International Collaboration on Advanced Neutron Sources
Oxford, 2017.
- [P8]. Piscitelli F, Messi F, Anastasopoulos M, Brys T, Chicken F, Dian E, Fuzi J, Höglund C, Kiss G, Orban J, Pazmandi P, Robinson L, Rosta L, Schmidt S, Varga D, Zsiros T, Hall-Wilton R:
The Multi-Blade Boron-10-based neutron detector for high intensity neutron reflectometry at ESS, 2017 *JINST* **12** P03013
- [P9]. E. Dian *et al.*, "Validation of Detailed Geant4 Model for Thermal Neutron Scattering using the Results of Multi-Grid Detector Prototype Test at CNCS at SNS," *2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, Atlanta, GA, 2017, pp. 1-3.
doi: 10.1109/NSSMIC.2017.8532930
- [P10]. BrightnESS Deliverable Report: D4.8 - Report on Simulation Tools for Detector and Instrument Design and Simulations for Early Instruments,
doi: [10.17199/brightness.d4.8](https://doi.org/10.17199/brightness.d4.8)
- [P11]. E. Dian, E. Klinkby, CJ Cooper-Jensen, D. Párkányi, D. Hajdu, J. Osán, G. Patriskov, U. Filges, PM. Bentley:
Preparation for activation measurements of concrete and PE-B4C-concrete to be applied for shielding at the European Spallation Source. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; **Vol. 1021**, No. 1.
doi: 10.1088/1742-6596/1021/1/012050
- [P12]. E. Dian, K. Kanaki R. Hall-Wilton, A. Khaplanov, P. Zagyvai:
Geant4 Study for Intrinsic Scattered Neutron Background in Multi-Grid Detector (konferencia-előadás)
International Workshop on Position Sensitive Neutron Detectors,
Jülich, 2018