

## **Príprava kurzu mikrodozimetrie zameraného na radiačný účinok radónu a jeho produktov premeny**

Predložená habilitačná práca pozostáva najmä z dvoch hlavných častí:

1. Súbor piatich vybraných prác autora dokumentujúcich výsledky jeho vedeckej práce v oblasti mikrodozimetrie dýchacích ciest (je ich prvým autorom) a jednej práce o význame štatistiky v príprave odborníkov v oblasti medicínskej fyziky (je spoluautorom a práca súčasne dokumentuje postavenie autora vo výučbe študentov odboru Biomedicínska fyzika na FMFI UK v Bratislave).
2. Rozsiahla výkladová časť vysvetľujúca problematiku radónu v súvislosti s rizikom vzniku nádorových ochorení dýchacích ciest a úlohu mikrodozimetrie pri predpovedaní rizika vzniku nádorového ochorenia. Táto časť obsahuje aj výsledky vedeckej práce autora a najdôležitejšie závery týkajúce sa porovnaniu rizika vzniku nádorov v dôsledku ožiarovania u fajčiarov/nefajčiarov a u detí/dospelých. Celá táto výkladová časť predstavuje (až na didaktické poznámky) v podstate študijný materiál k predmetu venovanému mikrodozimetrii dýchacích ciest.

Keďže priložené vybrané vedecké práce prešli recenzným konaním v zahraničných indexovaných časopisoch, o ich odbornej úrovni nie je dôvod pochybovať. Z hľadiska rozvoja vedeckej disciplíny považujem za najvýznamnejšie nasledujúce výsledky:

- Vytvorenie matematického modelu dýchacích ciest (hlienová vrstva, riasinková vrstva, sekrečné a bazálne bunky a ich jadrá), ktorý umožňuje metódou Monte Carlo analyzovať šírenie alfa-častíc v nich, ako aj vypočítať energiu uvoľnenú v bunkách a vyhodnotiť tak riziko ich poškodenia.
- Podrobnú analýzu vplyvu fajčenia na radónové riziko, pričom sú zohľadnené dva hlavné protichodné faktory: zvýšená ochrana dýchacích ciest fajčiarov hrubšou vrstvou hlienu a znížené odstraňovanie rádioaktívnych produktov z dýchacích ciest kvôli obštrukcii dýchacích ciest. Výsledky sú v dobrej zhode s publikovanými výsledkami epidemiologických štúdií a umožňujú presnejší odhad radónového rizika u fajčiarov, a to aj po ukončení fajčenia.
- Porovnanie radónového rizika u detí (ich dýchacie cesty sú menšie a majú tenšie steny) a dospelých, čo umožňuje presnejšie posúdenie rizika vzniku nádorových

ochorenia dýchacích ciest u detí v dôsledku ožiarenia rozpadovými produktami radónu.

Výkladová časť sa venuje nasledujúcim problémom:

- Radón a jeho produkty premeny, význam dcérskych produktov z hľadiska ožiarenia dýchacích ciest
- Biologické účinky žiarenia a súvisiace veličiny
- Mikrodozimetria ako nástroj odhadu onkologického rizika. Tu sú podrobnejšie analyzované:
  - Geometrický model dýchacích ciest
  - Mikrodozimetrický model a metóda Monte Carlo
  - Vplyv rozmerov dýchacích ciest (veku) na radiačné riziko
  - Vplyv fajčenia na radiačné riziko v rátane synergického efektu s obštrukčnou chorobou
  - Modifikovaný model hraničnej energie so zahrnutím zvýšeného karcinogénneho rizika fajčiarov v dôsledku produkcie survivinu
  - Súvis radónového rizika s pľúcnyimi zmenami u fajčiarov a s regeneráciou pľúc po ukončení fajčenia

Záver výkladovej časti je, okrem vysvetlenia najdôležitejších matematických vzťahov využívaných v predchádzajúcom texte, venovaný aj najčastejším miskoncepciám, s ktorými prichádzajú študenti a ktoré treba počas výučby odstrániť, ako napríklad to, že najväčšie riziko transformácie bunky na rakovinovú nie je vtedy, keď bunku zasiahne veľké množstvo energie (vtedy bunka zahynie), ale naopak, keď energie je menej a bunku pred smrťou zachráni samoopravné mechanizmy, ktoré niekedy zlyhajú a bunka ostane geneticky poškodenou. Túto časť považujem za veľmi dôležitú najmä pre vyučujúcich, lebo ich upozorňuje na oblasti, ktorým treba venovať zvýšenú pozornosť.

Pri čítaní výkladovej (študijnej) časti z pohľadu študenta mám k nej nasledujúce otázky:

1. Na strane 17 sa spomína, že zdrojom radónu v obytných priestoroch môžu byť aj použité stavebné materiály, bez podrobnejšej špecifikácie. Ktoré stavebné materiály sú z tohto hľadiska najviac a najmenej rizikové?
2. Obrázok 2.3. ukazuje vznik radiačnej rovnováhy produktov rozpadu radónu. Aké je podrobnejšie vysvetlenie príčin vzniku rovnováhy? Je možné podrobne vysvetliť vznik rovnováhy na jednoduchšom systéme, ako je napríklad rádioaktívny prvok s jedným dcérskym produktom?

3. V závere kapitoly 3.1 sa spomína, že ak je hustota ionizácie vysoká, tak radikály rekombinujú skôr, než stihnú reagovať napríklad s DNA. Je tento jav zodpovedný za pokles pri vysokých LET na obrázku 3.1?
4. Vo vzťahu (3.6) sa predpokladá Poissonovo rozdelenie. To je limitou pre veľmi malú pravdepodobnosť realizácie individuálneho javu pri súčasne veľmi veľkom počte pokusov. Ako je tento predpoklad splnený pri opisovanej depozícii?
5. Na konci kapitoly 3.4 sa spomína, že u alfa-častíc vzhľadom na vysoký stupeň ionizácie je úspešná oprava DNA nepravdepodobná, a preto sa obvykle používa bezprahový model. Ako je to s beta a gama žiarením? Môžu byť rádioaktívne kúpele zdraviu prospešné?
6. V texte je viackrát spomínaná kalibrácia modelov dátami z epidemiologickej štúdie Tomášeka. Ako kalibrácia prebiehala?
7. Pri výpočtoch radónového rizika sa často používa trojuholníková aproximácia frekvenčnej distribučnej funkcie lineárnej energie. Na obrázkoch 4.8 a 5.2 je však vidieť výrazný nárast pri malých hodnotách lineárnej energie. Aký vplyv má toto zanedbanie na presnosť odhadu rizika?
8. V kapitole 5.1 je uvedené porovnanie, že smrteľná dávka žiarenia predstavuje asi 280J, čo je veľmi malá hodnota v porovnaní s tepelnou energiou potrebnou na ohriatie organizmu alebo s mechanickou prácou potrebnou na jeho zdvihnutie. Nebolo by vhodné urobiť aj porovnanie s energiou strelnej zbrane (typicky 200-500J), s energiou nabitého kondenzátora schopného zastaviť/naštartovať srdce (typicky 100-200J)? V tomto kontexte energia smrteľnej dávky žiarenia nevyznieva až tak malo.
9. Kurz mikrodozimetrie končí samostatným spracovaním záverečnej úlohy, napríklad určiť faktor kvality v závislosti od hĺbky tkaniva pre dva izotopy polónia. V práci však nie sú uvedené detaily. Aké vstupy študenti dostanú a aké sa očakáva ich typické spracovanie?
10. V Závere autor spomína potenciálnu možnosť začlenenia kurzu mikrodozimetrie do študijného programu odboru Učiteľstvo fyziky v kombinácii. Majú na to študenti dostatočné vstupné vedomosti (napríklad z programovania), alebo by bolo treba kurz špecificky upraviť?

Celkovo konštatujem, že výkladová časť práce je napísaná pekným štýlom a celý kurz mikrodozimetrie je navrhnutý logicky, čo dokumentuje pedagogické majstrovstvo autora. Priložené práce majú zodpovedajúcu odbornú úroveň. Okrem toho RNDr. Radoslavov Böhm, PhD. patrí medzi najobľúbenejších učiteľov na FMFI UK a jeho pedagogické zaťaženie je

vysoko nadpriemerné. Preto odporúčam prijať predloženú habilitačnú prácu a udeliť RNDr. Radoslavovi Böhmovi, PhD. titul docent.

V Bratislave, 14.12.2022

doc. RNDr. František Kundracik, CSc.  
Katedra experimentálnej fyziky FMFI UK v Bratislave