

Spektra lineárního přenosu energie kosmického záření získaná detektory stop v pevné fázi metodou per partes

Kateřina PACHNEROVÁ BRABCOVÁ (brabcova@ujf.cas.cz) – Iva AMBROŽOVÁ – Marie DAVÍDKOVÁ, Oddělení dozimetrie záření, ÚJF AV ČR v.v.i., Praha

Yuma NAGASAKI, Oddělení dozimetrie záření, ÚJF AV ČR v.v.i., Praha; Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, Japonsko

Anna ČERVENKOVÁ, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze

Thomas BERGER, German Aerospace Center, Institute of Aerospace Medicine, Německo

Deskriptory *INIS*: COSMIC RADIATION; DIELECTRIC TRACK DETECTORS; ETCHING; INTERNATIONAL SPACE STATION; LET; RADIATION DOSES

Porovnání výsledků dozimetrických měření na Mezinárodní kosmické stanici je obtížné, vzhledem k tomu, že detektory měří jiné části spektra kosmického záření, jsou umístěny v různých pozicích, anebo se vyhodnocují různým způsobem. Sjednocení postupu vyhodnocování jednoho materiálu použitého jako detektor stop umožní získat lepší odrazový můstek k takovému porovnání, například mezi různými účastníky dozimetrických studií, a také ohodnotit vliv různých metod vyhodnocování na výsledky získané těmito detektory. Proto jsme do našeho portfolia pasivních detektorů stop v pevné fázi přidali v minulém roce další materiál a vyhodnocování pomocí dvojstupňového per partes leptání. To by mělo umožnit současně detekci částic s krátkým dosahem i nízkým lineárním přenosem energie.

1. ÚVOD

Kosmické záření, a z něj vyplývající riziko rakovinného bujení, představuje jeden z hlavních zdravotních problémů, kterým by čelila případná meziplanetární mise s lidskou posádkou. Nejistota odhadu rizika vyplývá zejména ze specifického biologického účinku kosmického záření na organizmy a extrapolaci těchto účinků na člověka, ale také na přesnosti dat o kosmickém záření a jeho změnách při průchodu pláštěm a součástmi lodi [1]. Experimentální dozimetrická měření na Mezinárodní kosmické stanici (International Space Station – ISS) přispívají ke snížení této nejistoty.

Jedním z takových dozimetrických měření je projekt DOSIS (Dosis distribution inside the International Space Station), který probíhal v letech 2009 až 2011, a na něj navazující projekt DOSIS 3D, který začal v roce 2012. Projekty se zaměřují na stanovení parametrů radiačního pole uvnitř evropského laboratorního modulu Columbus na ISS s použitím pasivních detektorů rozmístěných v různých pozicích v modulu pro sledování prostorového rozdělení záření a aktivních detektorů, které ve dvou neměnných pozicích kontrolují časové změny záření [2].

Po boku více než dvaceti dalších mezinárodních účastníků je naše oddělení postupně zapojeno do obou projektů a to s pasivními detektory stop v pevné fázi (DSPF) a detektory termoluminiscenčními. Srovnání

naměřených výsledků mezi účastníky je ovšem velice problematické a to z několika důvodů. Za prvé, každé používané detekční zařízení měří jiné části spektra kosmického záření a dochází jenom k částečnému, nebo vůbec žádnému překryvu. Za druhé, prostorové nároky detektorů se liší, a proto nemohou být umístěny v přesně stejných pozicích. Za třetí, i pokud používají účastníci stejný typ detekčního zařízení, často je vyhodnocují nebo výsledky zpracovávají jiným způsobem, což může výrazně zkreslit získaná data. Proto jsme do našeho portfolia používaných detektorů přidali v minulém roce také materiál Tastrak, DSPF používaný několika dalšími účastníky projektu, se kterými jsme sjednotili i postup vyhodnocování. Ten zahrnuje dvojstupňové per partes leptání, které by mělo umožnit identifikovat i částice s krátkým dosahem. Výsledky získané pomocí tohoto DSPF mohou sloužit jako určitá kalibrace pro srovnání výsledků i ostatních detektorů.

Spektra lineárního přenosu energie získaná s nově použitým, per partes leptaným materiálem byla porovnána s výsledky námi tradičně používaného, jedno-
stupňově leptaného materiálu. Materiály byly na ISS v průběhu tohoto roku umístěny ve stejné pozici, a proto srovnání jejich měření umožnilo ohodnotit vliv metody vyhodnocení na výsledky získané DSPF.

2. MATERIÁLY A METODY

Princip DSPF spočívá ve stabilizaci mikroskopických defektů, zvaných latentní stopy a způsobených ionizující částicí, působením leptacího činidla. Po určité době leptání se vytvoří v místě průchodu stopa částice kuželovitého tvaru, která se na povrchu detektoru jeví jako tmavá elipsa a lze ji pozorovat mikroskopem. Detektory stop registrují pouze nabitě částice s hodnotou lineárního přenosu energie (LPE) větší než prahová hodnota, která závisí na druhu materiálu a podmínkách vyhodnocování [3].

Pro experimenty ve vesmíru obvykle používáme materiál Harzlas TD1 (Nagase Landauer Ltd.), který má při jedno-
stupňovém leptání v 5 M NaOH při teplotě 70 °C po dobu 18 hodin nízký práh detekce, již kolem 7 keV/μm. Za uvedených podmínek je rychlost leptání neozářených částí materiálu asi 0,8 μm/hod, za celou dobu leptání se tedy odstraní asi 15 μm vrstvy materiálu na jedné straně detektoru [4]. To znamená, že stopy částic se srovnatelným, nebo kratším dosahem nebudou detekovány, protože dojde k jejich odleptání.

Nově používaný materiál Tastrak (Track Analysis Systems Ltd.) je leptán v 6,25 M NaOH při teplotě 70 °C, což odpovídá rychlosti leptání 1,34 μm/hod. Leptání je prováděno dvoustupňově, per partes, nejprve po dobu šesti hodin a poté dalších devět hodin. Mezi leptáními je detektor vyhodnocen, čímž se významně rozšíří možný

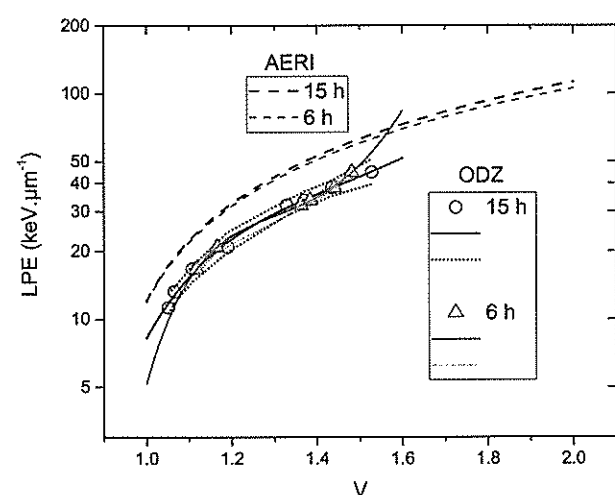
dosah detekovatelných částic. Pro krátkém leptání lze identifikovat i částice s krátkým dosahem a vysokým LPE, zatímco delší leptání naopak zviditelní částice s nízkým LPE.

Kalibrace obou materiálů, tedy nalezení vztahu mezi leptacím poměrem V s lineárním přenosem energie LPE, byla provedena pomocí svazků nabitých částic na urychlovači HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) v Japonsku. Leptací poměr V je definován jako poměr rychlosti leptání v místě stopy a v neozářené části detektoru. Rychlost leptání stopy lze odvodit z její velikosti měřením optickým mikroskopem [4]. Kalibrační body v rozsahu LPE 10 až 320 keV/μm a postup získání kalibrační křivky, včetně rozboru nejistot, pro materiál Harzlas TD1 jsme podrobně popsali v naší předchozí práci [4]. Materiál Tastrak byl prozatím kalibrován v pouze úzkém rozsahu LPE hodnot 11 až 44 keV/μm, se stíněnými a nestíněnými svazky iontů uhlíku a neonu, oba s nominální energií 400 MeV/u. Kalibrační křivky, včetně příslušných nejistot, po jednom i obou leptáních byly nalezeny postupem popsaným v [4] a porovnány s kalibračními křivkami Tastraku jiných účastníků projektu DOSIS 3D z Atomic Energy Research Institute (AERI), Maďarsko, a také s kalibrační křivkou pro Harzlas TD1.

Spektra LPE získaná s nově použitým, per partes leptaným materiálem Tastrak byla porovnána s výsledky jedno-
stupňově leptaného materiálu Harzlas TD1. Materiály byly na ISS umístěny ve stejné pozici v modulu Columbus od prosince 2015 do června 2016. Po návratu byly vyleptány výše popsanými způsoby a vyhodnoceny optickým mikroskopem.

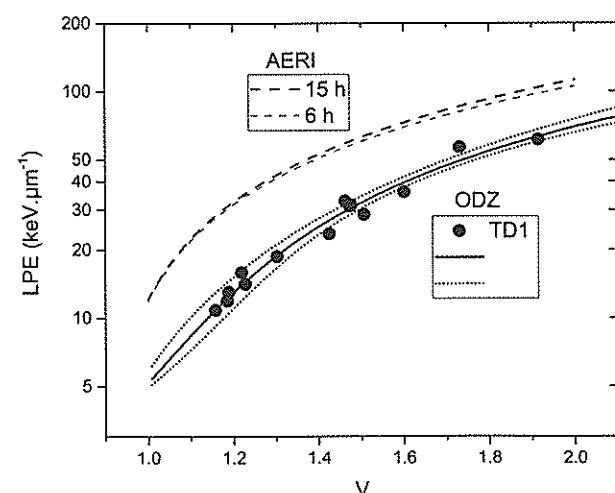
3. VÝSLEDKY A DISKUSE

Na obr. 1 jsou porovnány kalibrační křivky materiálu Tastrak po 6 a 15 hodinách leptání získané na našem oddělení (ODZ) a v maďarském AERI [5]. Kalibrační křivka AERI byla sestavena s kalibračními body s LPE až do 700 keV/μm. Je zřejmé, že příliš úzký rozsah kalibračních bodů použitých k sestavení ODZ křivek vede k odlišné extrapolaci závislosti již v oblastech LPE nad 50 keV/μm, stávající sada bodů musí být proto doplněna o další data s vyšším lineárním přenosem energie. Přestože byly kalibrační křivky získány stejným postupem, ve srovnání s křivkami AERI jsou ODZ křivky posunuté k nižším hodnotám LPE, přibližně o 30 %. Příčina této systematické výchyly je v současnosti diskutována a ověřována ve spolupráci s AERI, nicméně je zřejmé, že v procesu vyhodnocování detektorů je mnoho proměnlivých faktorů, které není jednoduché kontrolovat. Oba jevy naznačují, že kalibrační křivky Tastraku získané na ODZ nejsou v současnosti dostatečně spolehlivé, a proto v dalším budou použity pouze kalibrační křivky AERI.



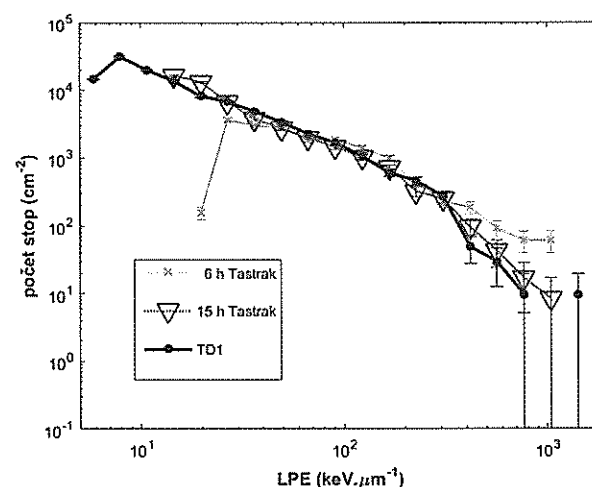
Obr. 1 Porovnání kalibračních křivek materiálu Tastrak získaných po 6 (šedé křivky a body) a 15 hodinách (černé křivky a body) leptání stejným postupem ve dvou institucích (ODZ plné křivky, AERI čárkované křivky). ODZ kalibrační křivky jsou doplněny konfidenčními intervaly (tečkované křivky) a kalibračními body

Na obr. 2 jsou porovnány kalibrační křivky materiálu Tastrak po 6 a 15 hodinách leptání získané v maďarském AERI a kalibrační křivka materiálu TD1 po 18 hodinách leptání získané a používané na ODZ. Lze pozorovat, že i v tomto případě je kalibrační křivka ODZ systematicky posunutá k nižším hodnotám LPE.



Obr. 2 Porovnání kalibračních křivek materiálu Tastrak získaných po 6 hodinách (šedá čárkovaná křivka) a 15 hodinách (černá čárkovaná křivka) leptání na AERI a ODZ kalibrační křivka materiálu TD1 (černá plná křivka), včetně konfidenčních intervalů (tečkované černé křivky) a kalibračních bodů

Na obr. 3 jsou porovnána spektra LPE naměřená ve stejném místě dvěma různými materiály, přičemž pro vyhodnocení per partes leptání materiálu Tastrak byly použity kalibrační křivky AERI. Materiál TD1 má evidentní výhodu nad materiálem Tastrak, totiž nižší práh detekce. Nicméně v oblasti nad 10 keV/μm je jeho odezva prakticky stejná jako 15 hodin leptaného Tastraku. Spektra naměřená Tastrakem leptaným pouze 6 hodin ilustrují výhodu per partes leptání – v oblasti nižších LPE materiál sice detekuje podstatně méně částic v důsledku toho, že jsou jejich rozměry pro analýzu už příliš malé, ale v oblasti vysokých LPE nad 300 keV/μm detekuje o 140 % více částic. Jak bylo vysvětleno výše, tyto částice mají při delších časech leptání dosah srovnatelný s odleptanou vrstvou a během vyhodnocování dojde k jejich odstranění. Sekundární částice s vysokým LPE i přes krátký dosah mohou mít negativní biologický účinek, a proto je detekce takových částic velmi důležitá.



Obr. 3 Porovnání spekter naměřených na Mezinárodní kosmické stanici materiálem TD1 (černá křivka), a materiálem Tastrak leptaným buď 15 hodin (tmavě šedá křivka s trojúhelníky), nebo 6 hodin (šedá křivka s křížky)

4. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo sjednocení postupu vyhodnocování materiálu použitého jako detektor stop, které by umožnilo získat lepší možnosti porovnání výsledků různých účastníků dozimetrických studií na Mezinárodní kosmické stanici. Ani použití stejného materiálu detektoru stop a koordinace stejného postupu vyhodnocování s Atomic Energy Research Institute v Maďarsku nezaručila automaticky stejný výsledek. To naznačuje význam proměnlivých veličin v procesu vyhodnocování a nutnost jejich dalšího zkoumání. Příčinou rozdílných výsledků může být také neúplná kalibrace, provedená zatím pouze s částicemi ve velmi

úzkém rozsahu LPE. Tento nedostatek musí být v budoucnu napraven.

Porovnání spekter lineárního přenosu energie měřených ve stejném místě i času na ISS dvěma různými materiály jasně prokazuje výhodu per partes leptání. Při aplikaci kratšího času leptání dochází k identifikaci více částic s LPE nad 300 keV/μm, zatímco po delším čase leptání se zviditelní částice s LPE blízko detekčního prahu. Kombinací takových spekter se dosáhne maximálního detekčního rozsahu pro stopové detektory.

Poděkování: Tato práce vznikla za laskavé podpory grantu GAČR 15-16622Y. Chceme také vyjádřit dík personálu urychlovače HIMAC a zejména prof. Naka-hiru Yasudovi z RINE, University of Fukui, který nám pomohl ozařování realizovat.

Literatura

- [1] DURRANTE, M. – CUCINOTTA, F. A.: 2008. Heavy ion carcinogenesis and human space exploration, *Nature Reviews Cancer* 8, 465-472.



Japonsko

8 let do restartu FBR Monju

News in Brief č. 237, 30. 11. 2016

Pro zavedení nových pravidel jaderné bezpečnosti je třeba 8 let a náklady 4.8 miliard euro na restart FBR Monju. Jedná se o rychlý reaktor chlazený sodíkem. Reaktor užívá mix palivo uran – plutonium. Využití těchto reaktorů je v recyklaci vyhořelého jaderného paliva z energetických reaktorů.

Restart 26 japonských reaktorů do roku 2018

News č. 66, 13. 12. 2016

„Institute of Energy Economics“ oznámil ve své zprávě o restartu jaderných energetických reaktorů po havárii na JE Fukushima, že 26 reaktorů bude znovu uvedeno do provozu do roku 2018. Zpráva je na <http://bit.ly/2gGGCrB>.

Finsko

JE Olkiluoto 3

Insider č. 20, 7. 12. 2016

Finsko oznámilo, že na počátku roku 2018 bude do reaktoru EPR 1600 JE Olkiluoto 3 zavedeno palivo pro provedení bezpečnostních zkoušek a analýz. Další JE je Hanhikivi 1 firmy Fenovoima s ruským reaktorem (Rosatom), jehož komerční provoz je předpokládán v roce 2024.

- [2] BERGER, T.: 2016. DOSIS & DOSIS 3D: long-term dose monitoring onboard the Columbus Laboratory of the International Space Station (ISS), *Journal of Space Weather and Space Climate*, DOI: 10.1051/swsc/2016034.
- [3] DURRANI, S. A. – BULL, R. K.: 1987. Solid state nuclear track detection – principles, methods and applications, Pergamon press.
- [4] PACHNEROVÁ BRABCOVÁ, K. – AMBROŽOVÁ, I. – KOLÍSKOVÁ, Z. – MALUŠEK, A.: 2013. Uncertainties in linear energy transfer spectra measured with track-etched detectors in space, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 713, 5-10.
- [5] PÁLFALVI, J. K.: 2009. Fluence and dose of mixed space radiation by SSNTDs achievements and constraints, *Radiation Measurements* 44, 724-728.

Lektoroval: P. Průša

SPRÁVY

Francie

Restart deseti reaktorů ve Francii

News č. 65, 6. 12. 2016

Francouzský dozor nad jadernou bezpečností (ASN) vydal povolení pro restart deseti jaderných reaktorů. Jedná se o reaktory 900 MW a 2 reaktory 1450 MW v lokalitách Bugey, Dampiere, Fessenheim, Gravelines, Tricasten a Saint Laurent.

Česká republika

Výběr jaderné technologie do roku 2020

Nuclear politics č. 12, 29. 12. 2016

Ve zprávě IEA se uvádí, že výběr nových jaderných energetických reaktorů bude proveden do roku 2018, povolení k výstavbě do roku 2025 a výstavba ukončena v roce 2035.

Švýcarsko

Referendum k odstávce JE

Nuclear Politics č. 11, 30. 11. 2016

Referendum k datu odstávky švýcarských JE zamítlo pevný časový plán ukončení provozu jaderných bloků. Jedná se o JE Beznau, Mühleberg, Gosgen a Leibstadt.