

Měření zeslabení těžkých nabitých částic při průchodu materiálem pomocí detektorů stop

Vít Kanclíř, G. Turnov
Kristína Nešporová, G. Boskovice
Tomáš Pikálek, G. Boskovice

Abstrakt

Práce se zabývá těžkými ionty a jejich průchodem materiálem. Vyhodnocovali jsme tři detektory stop v pevné fázi ozářené svazkem iontů neonu za různými tloušťkami teflonového stínění.

1 Úvod

Naším úkolem bylo analyzovat připravené detektory, které byly ozářeny na urychlovači těžkých iontů v Japonsku, poté byly naleptány a jejich povrchy naskenovány optickým mikroskopem. Tyto snímky analyzovat pomocí počítačového programu HspFit a vyhodnotit získané výsledky a jejich nejistoty.

Zkoumání chování těžkých iontů v materiálu může napomoci praktickému využití především v lékařství (onkologie). Zkoumání účinku těžkých iontů na materiál podobného chemického složení jako živá tkáň je také velice důležité pro připravované vesmírné lety mimo geomagnetické pole Země, například na Mars.

1.1 Lineární přenos energie

Energie, která je předána při zpomalování nabitě částice elektronům látky po dráze, je vyjádřena veličinou lineární přenos energie LET (z anglického *linear energy transfer*)

$$LET = \frac{dE}{dx}, \quad (1)$$

kde dE je energie přenesená v blízkém okolí dráhy nabitou částicí na elektrony při jejím průchodu po dráze dx . Více viz Musílek (2000).

1.2 Těžké ionty

Za těžké ionty považujeme nabitá atomová jádra od protonů výše. Při průchodu látkou hustě ionizují a excitují okolní atomy, s nimiž interagují, dále mohou ionty vstupovat do jaderných reakcí za vzniku fragmentů, což jsou pozůstatky původních iontů s větším či menším počtem nukleonů, takže může vznikat jiný prvek či jiný izotop. Při vzniku nového prvku se mění LET , čímž jej můžeme snadno rozpoznat, na rozdíl od vzniku izotopu.

Těžké ionty jsou součástí kosmického záření, tvoří podstatnou část tohoto záření. Vlivem geomagnetického pole a díky atmosféře Země se však ve velké míře nedostanou na zemský povrch či do jeho blízkosti. Nicméně u posádek letadel a zejména u vesmírných lodí je třeba dávky kontrolovat a nepřipustit překročení maximální povolené dávky.

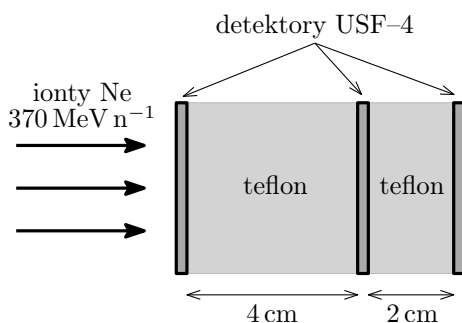
2 Metodika

2.1 Experiment

V rámci naší práce jsme vyhodnocovali tři detektory. Použité detektory byly na bázi PADC (polyallyl di-glykol karbonát, $C_{12}H_{18}O_7$), jednalo se o typ s označením USF-4. Jsou plastové a tenké, tedy velmi lehké. Díky tomu jimi záření snadno prochází, takže je možné je vrstvit za sebe, čímž jsou všechny ozařovány ve stejných podmínkách. Jejich chemické složení je obdobné jako složení lidského těla, z toho důvodu je možné pomocí nich demonstrovat účinek záření na tkáň.

Detektory byly předem ozářeny na urychlovači HIMAC v Chibe (Japonsko) svazkem iontů neonu o primární energii 400 MeV n^{-1} . Záření dopadalo kolmo na detektor, energie na dopadu byla 370 MeV n^{-1} .

První detektor byl nestíněný. Jelikož částice nejsou průchody detektory příliš ovlivněny, další detektory mohou být vloženy za předcházející (viz obrázek 1). Mezi nimi je pak teflonové stínění. První stínění má tloušťku 4 cm, druhé 2 cm. Druhý detektor je tedy za stíněním o tloušťce 4 cm, třetí za stíněním o tloušťce 6 cm.



Obrázek 1: Uspořádání detektorů při ozařování.

Po průchodu iontů zůstanou v detektorech latentní stopy. Ty jsou důsledkem narušení vazeb materiálu detektoru v okolí trajektorie procházející částice. Viditelné jsou pod elektronovým mikroskopem. Aby byly viditelné i pod mikroskopem optickým, byly detektory po ozáření vystaveny leptacímu činidlu. To postupně odleptává jeho povrch. V místech latentních stop dochází k rychlejšímu odleptávání materiálu detektoru. Po odleptání jsou tedy tyto stopy viditelné i pod optickým mikroskopem.

V našem případě byly detektory leptány po dobu 18 hodin pomocí 5 g mol^{-1} roztoku hydroxidu sodného při teplotě $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Při leptání se samozřejmě odstraní i část povrchu detektoru (obrázek 2). V našem případě byla tloušťka odleptané vrstvy metodou štěpných trosek stanovena na $B = 15,4 \text{ } \mu\text{m}$.

2.2 Zpracování výsledků

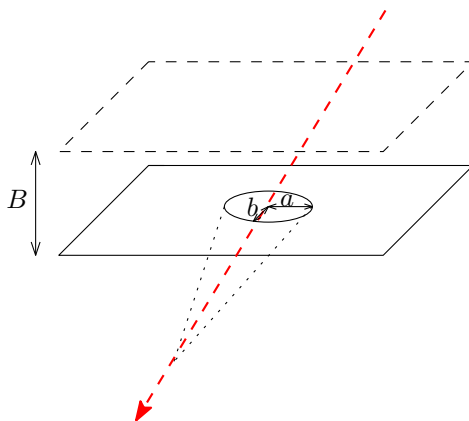
Povrch odleptaných detektorů byl skenován v optickém mikroskopu. Naskenované obrázky poté vyhodnoceny programem na analýzu povrchu detektorů HspFit (viz obrázek 3). Stopy po leptání mají tvar kružnice (v případě ideálně kolmého dopadu) či elipsy. Zmiňovaný program měří hlavní a vedlejší poloosu stop. Je však třeba vybrat, které útvary jsou opravdu stopami. Ačkoliv program automaticky vybírá nejpravděpodobnější útvary, poměrně často se stává, že vybere i různé nečistoty. Ty je třeba z měření ručně odstranit, případně nevybrané stopy ručně vybrat či upravit detekovaný tvar.

Pro každou vybranou stopu zmiňovaný program změří hlavní poloosu a a vedlejší poloosu b eliptické stopy. Následně se např. v Excelu spočítá rychlost leptání

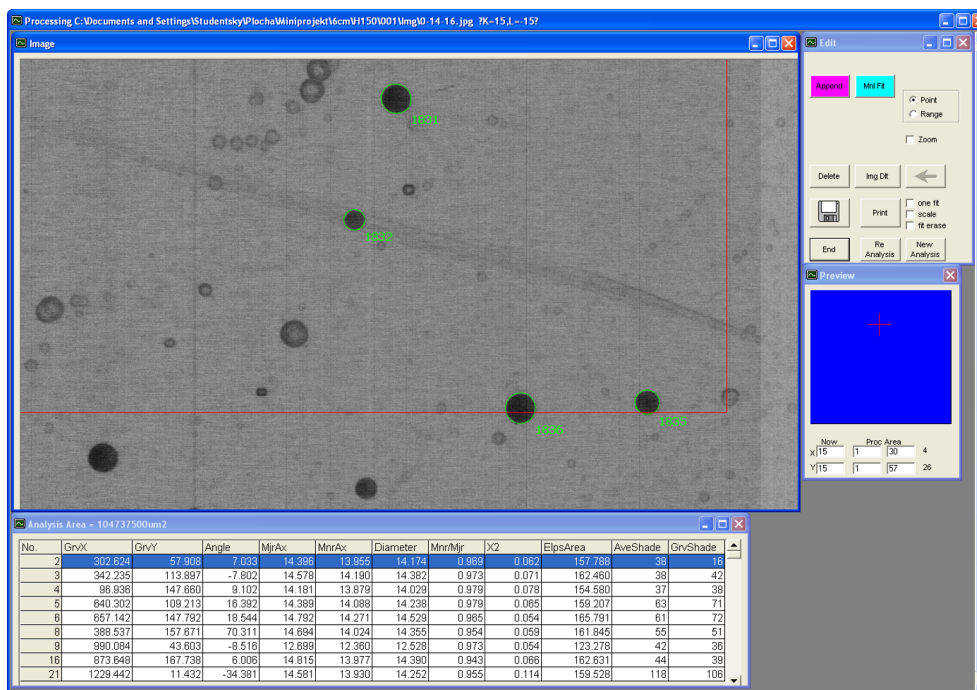
$$V = \sqrt{1 + \frac{(2\frac{a}{B})^2}{(1 - (\frac{b}{B})^2)^2}}, \quad (2)$$

kde $B = 15,4 \mu\text{m}$ je tloušťka odleptané vrstvy detektoru. Dále se pomocí kalibrační křivky určí

$$LET = 462,8 - (462,8 - 8,5)e^{-0,6(V-1)^{1,6}}. \quad (3)$$



Obrázek 2: Princip vytvoření stopy leptáním podél dráhy částice v detektorech stop pevné fáze.



Obrázek 3: Povrch detektorů s vyleptanými stopami zobrazený v programu HspFit, který byl použit pro analýzu detektorů.

3 Výsledky

Hodnoty LET , počet stop v jednotlivých detektorech a energie předaná částicemi poměrně odpovídají předpokladu (viz tabulka 1), že se LET bude zvyšovat se zvyšující se tloušťkou stínění a další dvě veličiny se budou snižovat. První detektor, který byl nestíněn, vykazuje nejmenší LET , neboť zde měl proud největší energii. Z grafického zpracování (viz obrázek 4) je zřejmé, že tímto detektorem prolétlo nejvíce primárních částic neonu (jeho pík je největší), proto byla prvnímu detektoru částicemi předána největší energie primárními částicemi i navzdory nízkému LET .

Při průchodu stíněním se intenzita neonových částic sníží a sníží se jejich kinetická energie, detekované LET se zvyšuje. Předaná energie bude ovšem menší, neboť počet primárních částic, které k druhému detektoru dorazí, je menší. Primární částice totiž mohou podléhat jaderným reakcím a energie těmito reakcemi vzniklých fragmentů jsme do předané energie nezapočítávali. Fragmenty vidíme i z grafu (viz obrázek 4), kde velký zelený pík představuje počet primárních částic neonu, které prošly druhým detektorem, a zelené pozadí před píkem tvoří právě fragmenty. Po průchodu druhým stíněním na třetím detektoru detekujeme ještě méně primárních částic, ovšem už dosti zpomalených, LET je zde téměř dvojnásobné.

Za pozornost stojí fakt, že zatímco počet stop částic v jednotlivých detektorech klesá vlivem stínění poměrně prudce (viz obrázek 5), pokles předané energie tak dramaticky neroste. Tento jev je způsoben právě narůstajícím LET , neboť částic je sice méně, ale jsou pomalejší, a proto předávají více energie okolí, než když předtím letěly rychleji.

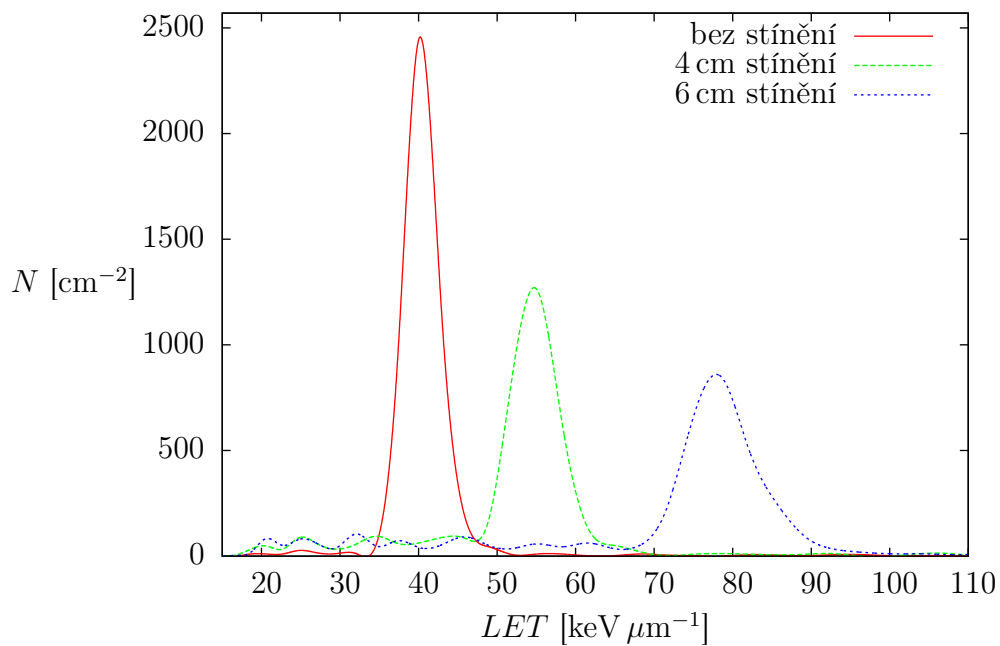
Tabulka 1: Hodnoty LET , počtů stop a předané energie od primárních iontů pro různé tloušťky stínění.

stínění [cm]	LET [keV μm^{-1}]	počet stop [cm^{-2}]	předaná energie [MeV μm^{-1}]
0	40,1	$4\,698 \pm 110$	$187,5 \pm 4,4$
4	50,1	$2\,758 \pm 100$	$137,5 \pm 4,9$
6	78,5	$2\,444 \pm 101$	$150,0 \pm 6,2$

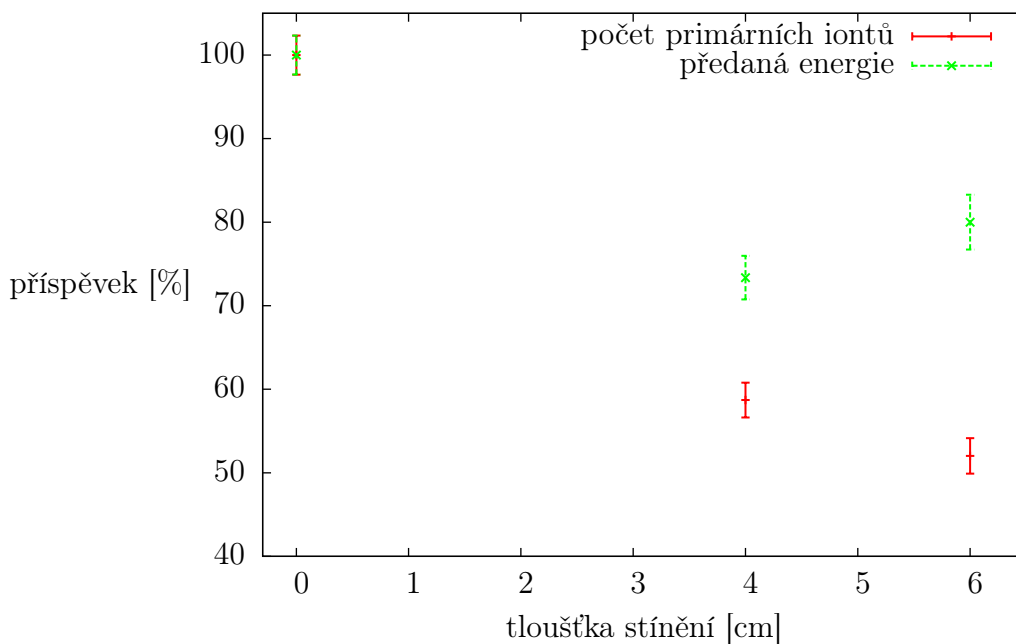
4 Využití

Námi používaná metoda měření zeslabení těžkých nabitých částic při průchodu materiálem se vzhledem k podobnému složení detektorů využívá při zkoumání působení těžkých nabitých částic na tkáň. A to ze dvou hlavních důvodů. Prvním je zkoumání stínění pro snížení dávky. Druhým je využití při tzv. hadronové terapii.

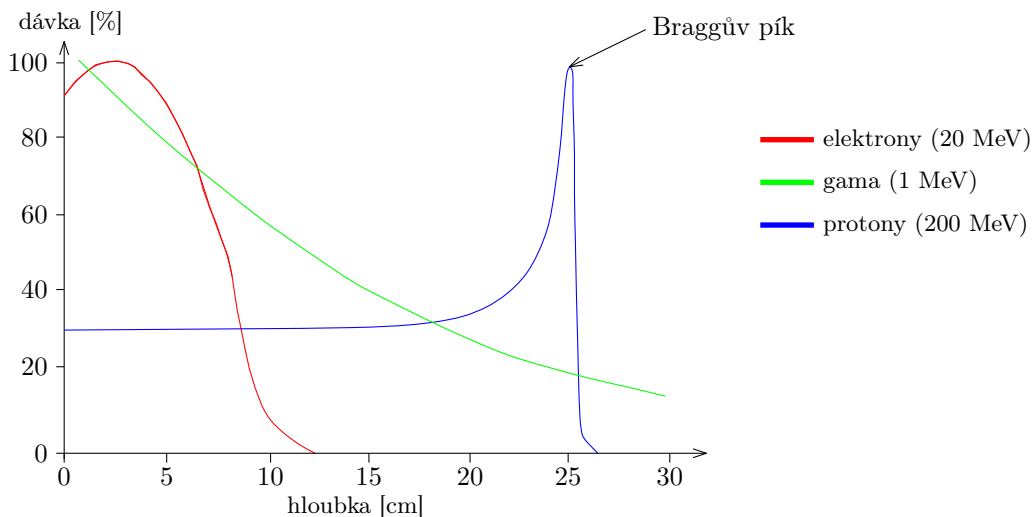
Hadronová terapie je velmi vhodným využitím těžkých nabitých částic v lékařství. Jedná se o neinvazní metodu léčení nádorů. Při běžně používaném ozařování pacientů svazkem elektronů či gama záření je poškozována velká část zdravé tkáně, neboť tyto lehké částice svou energii při průchodu tělem ztrácí relativně rychle. Tím poškozují buňky v okolí své trajektorie, včetně buněk zdravých. Naopak těžká jádra prochází při vyšší rychlosti tkání bez větší ztráty energie. energii ve větším množství ztrácí až ve chvíli, kdy je jejich rychlost nízká (viz obrázek 6). Méně tedy poškozují zdravou tkáň a více působí na místo nádoru.



Obrázek 4: Spektrum lineárního přenosu energie svazku neonu s primární energií 370 MeV n^{-1} procházející teflonovým stíněním.



Obrázek 5: Počet primárních částic neonu a předaná energie v závislosti na tloušťce teflonového stínění.



Obrázek 6: Závislost předané energie na hloubce při hadronové terapii. V případě protonů se velká část energie předává až v určité vzdálenosti (Braggův pík), čímž více působí na nádor a méně poškozují okolní zdravou tkáň.

5 Závěr

Seznámili jsme se s problematikou účinků těžkých iontů při průchodu materiálem. Hlavním cílem bylo analyzování předem připravených pasivních detektorů stop. Data získaná z programu HspFit jsme zpracovali a potvrzují naše předpoklady o narůstajícím *LET* a klesajícím počtu primárních částic. Nicméně je nutné podotknout, že pro dosažení relevantnějších a více vypočítatelných dat je třeba použití většího množství dat.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali naší supervizorce Ing. Zlatě Mrázové. Dále pořadatelům Týdne vědy, zvláště pak Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc., a v neposlední řadě Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

Literatura

- BRABCOVÁ K. *Studium a vývoj použití chemicky leptaných detektorů stop pro dozimetrické účely*. 2009. České vysoké učení technické v Praze.
- MUSÍLEK L. *Principy a praxe radiační ochrany*. Vyd. 1. Praha : Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000, ISBN 80-238-3703-6