



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



Ing. Ján Husár

Autoreferát dizertačnej práce

**ŠTÚDIUM PRODUKTOV ZÁCHYTU SEKUNDÁRNYCH
NEUTRÓNŮV KOZMICKÉHO ŽIARENIA V METEORITOCH**

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:

4.1.5 Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava, 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky, Univerzity Komenského v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Ján Husár
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Mlynská Dolina
842 48 Bratislava 4
Slovenská republika

Školiteľ: prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.

- Oponenti:**
1. prof. RNDr. Vladimír Porubčan, DrSc.
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzity Komenského
Mlynská dolina F/1, 842 48 Bratislava (porubcan@fmph.uniba.sk)
 2. Doc. RNDr. Pavol Valko, PhD.
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava (pavol.valko@stuba.sk)
 3. Doc. RNDr. Ivan Melo, PhD.
Katedra fyziky Žilinskej univerzity
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina (melo@fyzika.uniza.sk)

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o h

pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou

predsedom odborovej komisie **prof. RNDr. Jozefom Masarikom, DrSc.**

Študijný odbor: **4.1.5 jadrová a subjadrová fyzika**

Študijný program: **Jadrová a subjadrová fyzika**

na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského, Mlynská dolina,
842 48 Bratislava, miestnosť

Predseda odborovej komisie:

Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava
Slovenská republika

OBSAH

ÚVOD	2
1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	2
2 REAKCIE NÍZKO ENERGETICKÝCH NEUTRÓNOV KOZMICKÉHO ŽIARENIA	3
2.1 PRODUKCIA, TRANSPORT A ZÁCHYT NEUTRÓNOV	3
2.1.1 Produkcia neutrónov	3
2.1.2 Transport neutrónov	4
2.1.3 Účinné prierezy pre záchyt neutrónov	4
2.1.4 Integrál odozvy ako funkcia energie	5
3 POROVNANIE VÝSLEDKOV MODELOVANIA S PREDCHÁDZAJÚCIMI MODELOVANIAMÍ A EXPERIMENTÁLNYMI ÚDAJMI	5
3.1 RÁDIOAKTÍVNE KOZMOGÉNE NUKLIDY	5
3.2. SYSTEMATIKA SYSTÉMOV STABILNÝCH NUKLIDOV: Sm a Gd V KAMENNÝCH A KAMENNO ŽELEZNÝCH METEORITOKH	6
3.3 KADMIUM AKO MONITOR NEUTRÓNOV	6
3.4 PALÁDIUM AKO MONITOR NEUTRÓNOV	7
3.5 OSMIUM AKO MONITOR NEUTRÓNOV	8
3.6 PLATINA AKO MONITOR NEUTRÓNOV	8
3.7 IZOTOPY VOLFRÁMU V ŽELEZNÝCH METEORITOKH	8
4 ZHRNUTIE A ZÁVERY	9
SUMMARY	10
ZOZNAM PRÁC DIZERTANTA	11

ÚVOD

Všetky objekty v kozmickom priestore sú bombardované kozmickým žiarením. Podstatná časť častíc kozmického žiarenia má energie dostatočne vysoké na to, aby v ožarovanom telese iniciovali jadrové reakcie, ktoré vedú k tvorbe produktov, pôvodne v ožarovanej vzorke neprítomných. Medzi takéto najčastejšie študované produkty patria kozmogénne nuklidy a gama žiarenie, ktoré boli študované na zemskom povrchu a v atmosfére Zeme, na viacerých objektoch Slnecnej sústavy ako aj v meteoritoch. Mimoriadny význam pre pochopenie počiatkovej histórie slnečnej sústavy majú meteority. Väčšina z nich sú fragmenty asteroidov. Meteority sú tak vzorkami z malých telies s relatívne jednoduchou históriou, ktorá zostala v podstate nezmenená od čias formovania sa Slnecnej sústavy. Zrážky v pase asteroidov viedli k tomu, že sa niektoré fragmenty dostali na dráhy pretínajúce sa s dráhou Zeme, čím sa na Zem dostali vzorky, ktoré sú z hľadiska globálneho chemického zloženia terrestriálnych planét reprezentatívnejšie ako nám dostupný materiál na Zemi. Do konca 60-tych rokov, keď človek po prvý raz vstúpil na mimozemský kozmický objekt, meteority boli jedinými látkovými laboratórne analyzovateľnými kozmickými objektmi.

V počiatkovom štádiu rozvoja fyziky kozmického žiarenia boli študované predovšetkým jeho vlastnosti, neskôr, začiatkom 50-tych rokov minulého storočia sa pozornosť obrátila aj k produktom interakcií kozmického žiarenia s látkovým prostredím. Boli vyvinuté detekčné metódy na detekciu veľkého množstva produktov jadrových reakcií kozmického žiarenia. S využitím experimentálnych údajov získaných týmito metódami boli vyvinuté teoretické modely, ktoré sú nevyhnutnou podmienkou pre interpretáciu experimentálnych údajov. Bolo taktiež ukázané, že kozmické žiarenie je súčasťou celej histórie vesmíru a že pomocou neho možno študovať efekty, ktoré sa odohrali v dávnej minulosti. Toto nám umožňuje identifikovať dôležité štádiá procesy vo vývoji objektov Slnecnej sústavy. Na druhej strane nám to umožňuje povedať niečo aj o histórii kozmického žiarenia, o ktorom s pomerne malou mierou neistoty vieme povedať že v minulosti bolo konštantné.

Hlavným predmetom tejto práce je štúdium efektov vyvolaných záchytnom sekundárnych neutrónov galaktického kozmického žiarenia. Pozornosť sústreďujeme predovšetkým na efekty v železných meteoritoch. Tento záujem je motivovaný predovšetkým potrebami datovania týchto objektov, ktoré sú charakteristické dlhými expozičnými dobami a z toho dôvodu môžu byť užitočné pre štúdium počiatkových štádií formovania Slnecnej sústavy.

1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Preložená práca sa zaoberá simuláciou interakcií kozmického žiarenia s meteoritmi a inými mimozemskými objektmi.

Konkrétnymi cieľmi práce je:

- Štúdium spektier termálnych a epitermálnych neutrónov v železných meteoritoch, obyčajných chondritoch a uhlíkových meteoritoch.
- štúdium efektov vyvolaní záchytnom neutrónov v železných meteoritoch, obyčajných chondritoch a uhlíkových meteoritoch.
- štúdium efektov záchytnom termálnych neutrónov v závislosti od rozmerov ožarovaného objektu
- simulácia efektov záchytnom neutrónov pre stabilné nuklidy Cd, Pd, Os a Pt, ktoré môžu slúžiť ako monitory neutrónových tokov.
- stanovenie vplyvu záchytnom termálnych neutrónov na Hf- W chronometer

2 REAKCIE NÍZKO ENERGETICKÝCH NEUTRÓNŮV KOZMICKÉHO ŽIARENIA

Produkty interakcií kozmického žiarenia v meteoritoch alebo v planetárnych povrchoch sa využívajú na charakterizovanie expozičnej histórie ožarovaných objektov. Spočiatku sa hlavná pozornosť sústredila hlavne na kozmogéne nuklidy produkované v reakciách relatívne vysoko energetických častíc (protónov a neutrónov) s energiami nad 10 MeV. Vyššie hustoty tokov sú však dosahované pre neutróny s energiami pod 1 MeV, t.j. v oblasti tzv. epitermálnych neutrónov (energie 1-10 keV) a termálnych neutrónov (energie približne 0.025 MeV). Keďže niektoré vzácne zeminy majú relatívne veľký účinný prierez pre reakcie nízkoenergetických neutrónov, nimi vyvolané reakcie môžu viesť k experimentálne merateľným zmenám ich izotopických pomerov. Už desiatky rokov sa využívali takéto zmeny izotopických pomerov na štúdium expozičnej histórie a erózie mesačného povrchu (gardening effect) v dôsledku dopadu meteoritov, mikrometeoritov a kozmického prachu, a dokonca aj na štúdium efektov vyvolaných ranným aktívnym Slnkom.

Navyše záchytové reakcie neutrónov niekedy vedú ku komplikáciám v interpretácii experimentálnych výsledkov pomerov koncentrácií niektorých izotopov. Typickým príkladom, aj vďaka svojej veľkosti, je efekt vyvolaný na Hf - W systéme, ktorý sa využíva ako chronometer. V tomto prípade záchytové reakcie neutrónov vedú k zníženiu pomeru $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ a potom tieto príliš nízke hodnoty sú interpretované ako príliš staré časy pre formovanie jadier skúmaných objektov. Okrem toho záchytové procesy spôsobujú príliš veľký rozptyl meraných hodnôt izotopických pomerov pre danú skupinu železných meteoritov. Efekty vznikajúce v dôsledku záchytu termálnych a epitermálnych neutrónov boli už modelované pre niektoré systémy izotopov používaných na datovanie. Avšak detailné preskúmanie efektov vyvolaných záchytom neutrónov v rôznych typoch meteoritov ako aj konzistentné modelovanie záchytových procesov pre širokú triedu rádioaktívnych ale aj stabilných nuklidov je stále predmetom záujmu rôznych skupín.

Čiastočné vyplnenie tejto medzery je aj predmetom tejto dizertačnej práce. Modelovanie sme realizovali pre procesy záchytu neutrónov v uhlíkatých chondritoch, obyčajných chondritoch a železných meteoritoch. Po prediskutovaní produkcie a spomaľovania neutrónov sa zameriame na ohodnotenie veľkosti záchytových efektov na rôznych stabilných ako napríklad Cd, Sm, Gd, Pd, Pt, Os, a rádioaktívnych, ako napríklad Hf-W, nuklidových systémoch.

2.1 PRODUKCIA, TRANSPORT A ZÁCHYT NEUTRÓNŮV

V tejto časti stručne zhrnieme základné fakty o produkcii a transporte neutrónov ako aj o účinných prierezoch pre ich záchyt.

2.1.1 Produkcia neutrónov

Keďže galaktické kozmické žiarenie pozostáva hlavne z protónov a alfa častíc (ťažšie prvky tvoria len asi 1 %) temer všetky neutróny, ktoré sú k dispozícii na jadrové reakcie v meteoritoch sú sekundárne, t.j. boli emitované v jadrových reakciách. Keďže emisia neutrónov nie je potláčaná Coulombickou bariérou, ich toky sú vyššie ako toky sekundárnych protónov a to najmä pri nízkych energiách. Hustoty tokov sekundárnych častíc v meteorite závisia od jeho polomeru, od hĺbky, z ktorej pochádza študovaná

vzorka, ale aj od chemického zloženia ožarovaného objektu čo označujeme ako maticový efekt. V ďalšom sa budeme zaoberať hlavne neutrónmi.

2.1.2 Transport neutrónov

V tejto časti zrekapitulujeme základné aspekty modelovania transportu neutrónov. S uvažovaním pružného rozptylu neutrónov vzťah medzi energiou E [eV] dopadajúceho a energiou E' [eV] rozptýleného neutrónu v laboratórnej sústave a uhlom rozptylu Θ_c v sústave hmotného stredu je

$$\frac{E'}{E} = \frac{A^2 + 1 + 2 \times A \cos \theta_c}{(A+1)^2} \quad (3.1)$$

kde A je hmotnostné číslo. K maximálnej strate energie dochádza pre $\Theta_c = \pi$, t.j. pre spätný rozptyl neutrónu. Pre vodík, $A=1$, celú energiu neutrón môže stratiť v jednej zrážke. Pre ťažšie nuklidy sa v jednotlivých zrážkach stráca len malá časť energie ($4A(A+1)^2 \approx 1/A$). Pre ťažké nuklidy je táto frakcia stratenej energie veľmi malá. Ak energetická strata v jednotlivých zrážkach je malá, potom spomaľovanie neutrónov sa deje vo viacerých krokoch a frakcia stratenej energie je nezávislá od počiatocnej energie neutrónu. Skoro vo všetkých typoch meteoritov je preto potrebné veľa zrážok na zníženie počiatocnej energie neutrónu (obyčajne niekoľko MeV) na hodnotu typickú pre termálne a epitermálne neutróny.

V skutočnosti opis spomaľovania neutrónov len takýmto jednoduchým viackrokovým procesom nie je dostatočne presný. Pre terče obsahujúce ťažšie prvky je potrebné zobrať do úvahy aj procesy absorpcie neutrónov počas procesu spomaľovania.

2.1.3 Účinné prierezy pre záchyt neutrónov

Pre nízkoenergetické neutróny je potrebné rozlíšiť aspoň dva energetické intervaly. Pre veľmi nízke energie vykazujú účinné prierezy závislosť $1/v$, pričom v je rýchlosť neutrónu. Pre vyššie energie a hlavne pre ťažšie prvky sú dôležité rezonancie, ktoré samozrejme závisia od štruktúry atómového jadra. V oblasti rezonancií účinný prierez pre záchyt môže vzrásť o niekoľko rádov. S narastajúcou energiou počet rezonancií na jednotku energie vzrastá, čo vedie k prekryvu rezonancií a ku vzniku kontinua. Pre väčšinu prvkov prítomných v meteoritoch pozorujeme $1/v$ závislosť bez, alebo len s málo nevýraznými rezonanciami, pričom jednou významnou výnimkou je železo, ktoré má výraznú rezonanciu pre 1.16 keV. Tu je potrebné ešte raz zdôrazniť, že v meteoritoch väčšina prvkov hrajúcich významnú úlohu pri spomaľovaní neutrónov má $1/v$ závislosť účinných prierezov od energie (s výnimkou Fe), ale väčšina ťažkých prvkov, ktoré nás zaujímajú majú aj výrazné rezonancie.

Ako sme už vyššie spomenuli v prípade ťažkých prvkov dominujú v záchytech neutrónov rezonancie a preto v tomto prípade neutrónové účinné prierezy nie sú dobrým indikátorom záchytových procesov. V prípade spektra vykazujúceho $1/E$ závislosť je rezonančný integrál, ktorý berie do úvahy záchyt neutrónov rezonanciou pre $1/E$ spektrálny tvar oveľa lepšou aproximáciou a indikátorom záchytových procesov.

2.1.4 Integrál odozvy ako funkcia energie

Ako už bolo detailne opísané v prechádzajúcich publikáciách, produkčná rýchlosť P_j [atómov/(g × s)] kozmogeného nuklidu j je

$$P_j(R, d, M) = \sum_{i=1}^N c_i \frac{N_A}{A_i} \sum_{k=1}^3 \int_0^{\infty} \sigma_{jik}(E) J_k(E, R, d, M) dE$$
$$= \sum_{i=1}^N c_i \frac{N_A}{A_i} \sum_{k=1}^3 \int_0^{\infty} \text{Resp}_{jik}(E) dE \quad (3.6)$$

kde N_A je Avogadrovo číslo [1/mol], A je hmotnostné číslo terčového prvku [g mol⁻¹], c_i je abundancia terčového jadra i [g · g⁻¹] a k je index označujúci typ reagujúcej častice (protón alebo neutrón). Excitačná funkcia pre produkciu nuklidu j z terčového jadra i časticou typu k je σ_{jik} [cm²] a J_k [1/(cm² s MeV)] je hustota diferenciálneho toku častíc typu k . Polomer meteoritu, o ktorom sa predpokladá, že je sférický je R a d je hĺbka v ktorej sa nachádza vzorka a E a M sú energia reagujúcej častice respektíve solárny modulačný parameter. Solárny modulačný parameter M [MeV] je energia stratená časticou GCR po jej vstupe do Slnečnej sústavy počas transportu na konkrétne dané miesto v jej vnútri.

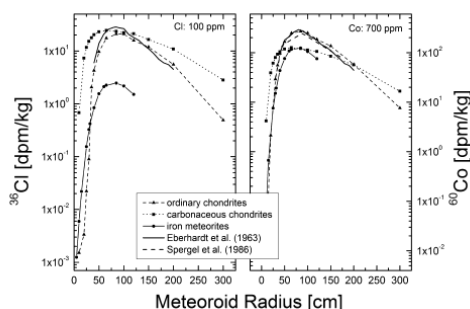
Na ľavej strane rovnice 3.6 sme zaviedli tzv. odozvový integrál $\text{Resp}(E)$, ktorý reprezentuje súčin účinného prierezu a hustoty diferenciálneho toku častíc. Z tejto definície odozvového integrálu, že jeho integrál je priamoúmerný celkovej produkčnej rýchlosti. Zavedenie tohto integrálu je užitočné hlavne pre účely zistenia, akej energie častice dávajú najväčší vklad do produkcie daného nuklidu.

3 POROVNANIE VÝSLEDKOV MODELOVANIA S PREDCHÁDZAJÚCIMI MODELOVANIAM I A EXPERIMENTÁLNYMI ÚDAJMI

3.1 RÁDIOAKTÍVNE KOZMOGÉNE NUKLIDY

Výsledky našich simulácií pre ³⁶Cl a ⁶⁰Co v obyčajných chondritoch sú v dobrej zhode so staršími výsledkami Obrázok 4.1 zobrazuje produkciu ³⁶Cl a ⁶⁰Co v strede obyčajného a uhlíkatého chondritu a železného meteoritu. Sú tam takisto zobrazené staršie výsledky. Zhoda je lepšia ako 25 % a taktiež závislosť produkčnej rýchlosti od polomeru je veľmi podobná pre všetky tri prístupy.

Produkčná rýchlosť ⁶⁰Co záchyтом tepelných neutrónov sa tiež veľmi dobre zhoduje s experimentálnymi údajmi. Napríklad aktivita ⁶⁰Co v H5 chondrite Jilin sa pohybuje v intervale 53 – 260 dpm.kg⁻¹ pričom koncentrácia terčového jadra ⁵⁹Co 750 ppm t.j. presne vo vnútri intervalu nami simulovaných hodnôt. Pre meteoroid Allende je meraná aktivita ⁶⁰Co v rozmedzí 9-226 dpm kg⁻¹, pričom väčšina údajov je z intervalu 41 – 185 dpm.kg⁻¹, čo je opäť v pomerne dobrej zhode s našimi výpočtami. Keďže Allende obsahuje relatívne málo vodíka, záchyt termálnych neutrónov je preň lepšie popísaný simuláciami pre obyčajné chondrity ako pre uhlíkaté.



Obrázok 4.1. Produkcia ^{36}Cl (pravý panel) a ^{60}Co (pravý panel) v (n,γ) reakciách v strede sférického meteoroidu ako funkcia jeho polomeru. Zobrazené sú výsledky pre obyčajné chondrity, uhlíkaté chondrity a železné meteority. Pre výpočty boli použité nasledovné koncentrácie terčových jadier Cl: 100 ppm; Co: 700 ppm.

3.2. SYSTEMATIKA SYSTÉMOV STABILNÝCH NUKLIDOV: Sm a Gd V KAMENNÝCH A KAMENNO ŽELEZNÝCH METEORITOCH

Obrázok 4.2 zobrazuje pomer $^{158}\text{Gd}/^{157}\text{Gd}$ ako funkciu pomeru $^{150}\text{Sm}/^{149}\text{Sm}$ pre mesačné vzorky obyčajné chondrity uhlíkaté chondrity a mesosiderity. Na obrázku sú taktiež zobrazené korelačné funkcie pre uhlíkaté a obyčajné chondrity a železné meteority. Čiarkované čiary znázorňujú očakávané korelácie, ak by izotopické posuny boli len v dôsledku záchytu termálnych neutrónov a bodkované čiary sú očakávané korelácie za predpokladu, keby ku zmenám v izotopických pomeroch dochádzalo len v dôsledku záchytu epitermálnych neutrónov, t.j. celý záchyt je len v oblasti rezonančných neutrónov. Preto očakávame, že veľa experimentálnych údajov padne medzi dve spomínané čiary, čo obrázok 4.2 aj potvrdzuje.

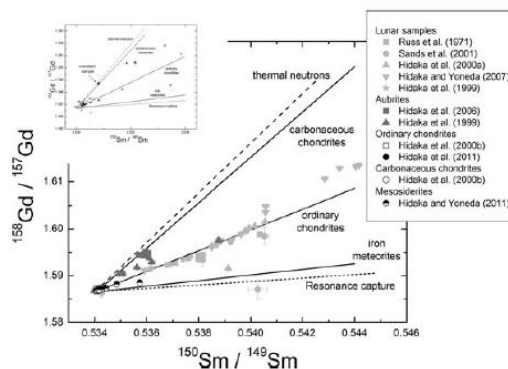
Výsledky simulácií potvrdzujú že stupeň termalizácie neutrónov narastá od železných meteoritov, v ktorých sú zachytávané neutróny hlavne s rezonančnými energiami, cez obyčajné meteority, ktoré zachytávajú neutróny s energiami medzi rezonančnými a termálnymi, až po uhlíkaté kde väčšina zachytených neutrónov sú termálne alebo blízko termálne.

Okrem meteoritov sú na obrázku aj údaje pre $^{158}\text{Gd}/^{157}\text{Gd}$ pomer ako funkcia $^{150}\text{Sm}/^{149}\text{Sm}$ aj pre štandard, ktorý bol ožarovaný neutrónmi s tokom $5.94 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$. Údaje pre štandard padli na krivku vypočítanú pre záchyt termálnych neutrónov čo svedčí o tom že (a) naše výpočty sú správne (b) a v žiadnej z vyšetovaných vzoriek k posunu pomerov nedošlo v dôsledku záchytu len termálnych neutrónov, ale vždy časť zmeny pomeru spôsobil záchyt rezonančných neutrónov.

3.3 KADMUIM AKO MONITOR NEUTRÓNŮV

Izotopy kadmia sú často považované za dobré monitory neutrónov (neutron dose proxy), pretože ^{113}Cd má veľký účinný prierez (viac ako 20 000 barnov) pre záchyt termálnych neutrónov. Z tohto dôvodu sme modelovali posun izotopického pomeru $^{114}\text{Cd}/^{113}\text{Cd}$. Výsledok je prekvapivý, ale pochopiteľný. Izotopické posuny v obyčajných a uhlíkových meteoritoch sú veľké. Dosahujú hodnoty až 0.9ε (posun o 1ε znamená zmenu na úrovni 10^{-4}) na milión rokov ožarovania. Keďže neutróny sú efektívnejšie termalizované

v uhlíkových meteoritoch ako v obyčajných chondritoch, maximálny efekt v uhlíkových meteoritoch sa dosahuje v menších hĺbkach (v strede meteoroidu s polomerom 65 cm). V obyčajných chondritoch je to v strede objektu s polomerom 100 cm. Naopak uvážiac, že záchyt neutrónov na ^{113}Cd sa deje temer kompletne na termálnych neutrónoch (rezonančný záchyt je ledva pozorovateľný), ale toky termálnych neutrónov sú nízke v železných meteoritoch preto posun v pomere $^{114}\text{Cd}/^{113}\text{Cd}$ v železných meteoritoch je malý t.j. pod 0.01ϵ na milión rokov expozície. V dôsledku tohto izotopy Cd sa dajú použiť ako spoľahlivé monitory tokov neutrónov pre väčšinu kamenných meteoritov avšak ich využitie pre železné meteority je značne limitované nielen kvôli malým posunom v pomeroch ale aj pre nízku koncentráciu Cd čo robí presné meranie tak malých posunov temer nemožným.



Obrázok 4.2. Výsledky simulácií pre izotopové pomery $^{158}\text{Gd}/^{157}\text{Gd}$ ako funkciu $^{150}\text{Sm}/^{149}\text{Sm}$ pre uhlíkaté a obyčajné chondrity a pre železné meteority. Zobrazené sú tiež očakávané posuny v dôsledku záchytu len termálnych neutrónov alebo len neutrónov s energiami z rezonančnej oblasti, ako aj experimentálne údaje pre mesačné vzorky, obyčajné a uhlíkaté chondrity a mesosiderity.

3.4 PALÁDIUM AKO MONITOR NEUTRÓNŮV

Humayun and Huang v roku 2008 ako prvý navrhli izotopy paládia ako dobrý indikátor (proxy) pre efekty spôsobené záchytom neutrónov v železných meteoritoch. Paládium považovali za vhodné lebo (1) predchádzajúce štúdie Pd izotopov ukázali, že paládium v železných meteoritoch nevykazuje endemické jadrové anomálie a (2) Pd je multiizotopový prvok a preto umožňuje internú normalizáciu. Na nešťastie väčšina Pd izotopov má relatívne malé účinné prierezy pre záchyt termálnych neutrónov a rezonančné integrály vedú len k malým posunom izotopických pomerov. Východiskom z tejto komplikovanej situácie je ^{103}Rh , ktoré sa po záchyťe neutrónov mení na rádioaktívne ^{104}Rh , ktoré sa premieňa β premenou na stabilné ^{104}Pd . Rénium 103 má relatívne veľký účinný prierez pre záchyt termálnych neutrónov (150 barnov) a rezonančný integrál okolo 1000 barnov. Z toho vyplýva, že zmeny v dôsledku záchytu neutrónov vedú k nadprodukcii ^{104}Pd . Tu však treba mať na pamäti, že nadbytok ^{104}Pd závisí nielen od toku neutrónov, ale aj od elementálneho pomeru Rh/Pd.

3.5 OSMIUM AKO MONITOR NEUTRÓNŮV

Zmeny izotopických pomerov osmia v železných meteoritoch typu IVB vyvolané kozmickým žiarením boli použité ako monitor toku neutrónov pre korekciu kozmogénnych efektov vo volfrámových izotopoch. Tu prezentujeme prvé modelové výpočty pre kozmogéne efekty na Os izotopoch s uvažovaním nielen záchytovej reakcie na nich samotných, ale aj s uvažovaním príspevku k produkcii ^{192}Os a ^{188}Os v dôsledku zachytu neutrónov na ^{191}Ir a ^{187}Ir .

Z výsledkov možno urobiť dva podstatné závery. Po prvé, zmeny izotopických pomerov osmia závisia od pomeru Ir/Os a Re/Os, Po druhé, predpovede modelu opisujú experimentálne údaje celkom dobre, čo kvantitatívne znamená, že zhoda je vždy v rámci 2σ , čo možno interpretovať, že model je vierohodný.

Ďalším výsledkom je skutočnosť, že zmeny pomerov izotopov v dôsledku zachytu neutrónov môžu byť zanedbané pre ^{187}Re - ^{187}Os systém využívaný na datovanie železných meteoritov.

3.6 PLATINA AKO MONITOR NEUTRÓNŮV

Platina 195 má účinný prierez pre zachyt termálnych neutrónov 27 barnov a rezonančný integrál viac ako 370 barnov, čo vedie k merateľným zmenám posunu izotopického pomeru $^{196}\text{Pt}/^{195}\text{Pt}$. ^{196}Pt je produkované zachytom neutrónov na ^{195}Pt . Ďalej ^{191}Ir má veľký účinný prierez pre zachyt termálnych neutrónov, ktorého hodnota je viac ako 900 barnov a taktiež veľký rezonančný integrál s hodnotou viac ako 3500 barnov. Po zachytení neutrónu ^{191}Ir vzniká ^{192}Ir , ktoré sa cez β premenu mení na ^{192}Pt . V dôsledku tohto zachytu neutrónov na ^{191}Ir môže viesť, v závislosti od pomeru Ir/Pt, k veľkému nárastu ^{192}Pt . Množstvo ^{192}Pt závisí od hĺbky v ožarovanom objekte, expozičnej doby a elementálneho pomeru Ir/Pt. Z tohto dôvodu pre použitie Pt ako monitora toku neutrónov možno použiť pomery $^{196}\text{Pt}/^{195}\text{Pt}$, alebo $^{192}\text{Pt}/^{195}\text{Pt}$ pričom v druhom prípade je potrebné merať aj pomer Ir/Pt v meranej vzorke.

Z dobrej zhody experimentálne nameraných a vypočítaných dát je možné urobiť záver, že izotopy Pt sú dobrým monitorom toku neutrónov v železných meteoritoch a že zmeny v pomeroch jednotlivých izotopov spôsobené kozmickým žiarením môžu byť presne opísané našim modelom.

3.7 IZOTOPY VOLFRÁMU V ŽELEZNÝCH METEORITOCH

Je všeobecne známe že interpretáciu experimentálnych údajov o obsahu izotopov volfrámu v železných meteoritoch a mesačných vzorkách komplikujú zmeny ich pomerov vyvolané v dôsledku efektov zachytu sekundárnych neutrónov kozmického žiarenia. Niektoré z predchádzajúcich štúdií s využitím kozmogénnych nuklidov používali ako monitor efektov zachytu neutrónov na izotopoch volfrámu ^3He . Problém s použitím ^3He je však v tom, že ono je produkované neutrónmi so strednými a vysokými energiami, pričom procesy na volfráme sú vyvolané prevažne termálnymi a epitermálnymi neutrónmi. Z tohto dôvodu nedostatok, alebo úplná absencia ^3He neznamená automaticky aj absenciu alebo slabý efekt aj na izotopoch volfrámu a naopak. Vykonali sme preto sériu simulácií s cieľom lepšie kvantifikovať efekty zachytu neutrónov v železných meteoritoch.

Aj keď náš model ako sme diskutovali vyššie nie je perfektný, fituje experimentálne údaje celkom dobre, čo kvantitatívne značí, že zhoda je v rámci experimentálnych neistôt. Z fitu experimentálnych údajov takisto môžeme určiť priesečník fitu s osou y, ktorý

udáva pomer $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ pred začiatkom expozície kozmickým žiarením. Získaná hodnota - 3.06 ± 0.12 (2σ), t.j. hodnota trochu vyššia, ale v dobrej zhode s preexpozičnou hodnotou zo skorších štúdií.

4 ZHRNUTIE A ZÁVERY

S použitím spektier primárnych a sekundárnych protónov a sekundárnych neutrónov spolu s vypočítanými alebo evaluovanými účinnými prierezmi sme študovali efekty vyvolané záchyтом neutrónov v železných meteoritoch, obyčajných chondritoch a uhlíkových meteoritoch. Spektrá častíc boli vypočítané pomocou Monte Carlo kódov a účinné prierezy boli získané s použitím jadrovofyzikálneho kódu TALYS, alebo boli zobrahané z databázy JEFF-30A. V dizertačnej práci sme sa sústredili hlavne na železné meteority. Simulácie neutrónových spektier v železných meteoritoch ukázali, že v nich sú toky termálnych neutrónov veľmi malé. Väčšina neutrónov z nich alebo unikne alebo sú zachytené obrovskou rezonanciou ^{56}Fe pred spomalením na termálne energie. V dôsledku toho väčšina reakcií záchyту neutrónov v železných meteoritoch je v dôsledku záchyту epitermálnych, nie termálnych neutrónov. Podobné výsledky vykazujú aj chondrity, pre ktoré záchyt epitermálnych neutrónov predstavuje podstatnú časť ich celkového záchyту.

Po tom ako sme demonštrovali vierohodnosť nášho modelu na porovnaní experimentálnych a nasimulovaných výsledkov pre produkciu ^{36}Cl a ^{60}Co , modelovali sme rýchlosti záchyту na Sm a Gd a porovnali sme naše výsledky s hodnotami z publikovaných článkoch. Zhoda je vo všetkých prípadoch dobrá, čo ďalej potvrdzuje kvalitu nášho modelu. Aj tieto dáta jasne ukazujú na fakt že záchyt neutrónov v kamenných meteoritoch a v mesačnom regolite sa nedeje len cez záchyt termálnych neutrónov, ale podstatný vklad pochádza aj od epitermálnych neutrónov.

Nasimulovali sme efekty záchyту neutrónov pre stabilné nuklidy Cd, Pd, Os a Pt, ktoré môžu slúžiť ako monitory neutrónových tokov. Výsledky simulácií pre Os a Pt sú v dobrej zhode s ich nedávnymi meraniami v železných meteoritoch. Ako sme predpokladali v dôsledku nízkych tokov termálnych neutrónov v železných meteoritoch, namodelované izotopické posuny pomerov Cd izotopov sú veľmi malé, čo značne limituje ich použitie pre monitorovanie tokov neutrónov vo vnútri týchto meteoritov. Modelované zmeny v pomeroch Os, Pt a Pd sú merateľné súčasnými meracími prístrojmi a analytickými prístupmi, čo umožňuje ich použitie na monitorovanie neutrónových tokov v exponovaných objektoch.

V ďalšom kroku sme modelovali vplyv efektov záchyту neutrónov na izotopoch volfrámu v závislosti od zmien izotopických pomerov platiny a osmia. Zdá sa, že model nadhodnocuje produkciu ^{182}W v dôsledku záchyту neutrónov o faktor zhruba 2 v železných meteoritoch typu IVB, avšak reprodukuje experimentálne údaje v rámci ich neurčitosti v železných meteoritoch triedy IID, rozdiely vo výsledkoch interpretovali ako dôsledok variácií v chemickom zložení meteoritov vo vnútri triedy IVB, ako aj vo vnútri samotných meteoritov (nehomogenity v zložení), čo vedie k určitým zmenám v početnosti, ale aj spektrálnom rozdelení sekundárnych neutrónov kozmického žiarenia.

Predchádzajúce štúdie argumentovali, že rozdiely sú dôsledkom nadhodnotených účinných prierezov pre záchyt neutrónov. Na základe našich výsledkov sme detailne zdôvodnili prečo vylučujeme ako príčinu pozorovaných rozdielov na úrovni faktoru 2 variácie v koncentrácii stopových prvkov vo vnútri meteoritu a medzi meteoritmi v rámci jednej triedy železných meteoritov. Na základe vyhodnotenia skôr publikovaných výsledkov, sme dospeli k záveru, že neexistujú ani argumenty pre tvrdenie, že účinné prierezy pre relevantné procesy sú chybné a majú byť preškálované faktorom 2. Aby sme zachovali konzistenciu modelu a jeho vierohodnosť rozhodli sme sa nemeniť rýchlosť záchyту

na žiadnom izotope a považujeme naše simulácie za relatívne presné, k čomu nás vedie dobrá zhoda simulácií s experimentálnymi údajmi pre ostatné študované izotopy. Bez rozlíšenia triedy železných meteoritov dostaneme uspokojivý opis experimentálnych údajov, t.j. fit sa zhoduje s experimentálnymi údajmi v rámci neistôt meraní. Pre pomer $\varepsilon(^{196}\text{Pt}/^{195}\text{Pt}) = 0$ dostávame na základe našich simulácií hodnotu $\varepsilon(^{182}\text{W}/^{184}\text{W}) = -3.06 \pm 0.12$ (2σ), ktorá udáva preexpozičný pomer $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ a je v dobrej zhode s hodnotou získanou inými autormi.

SUMMARY

The nuclear products that arise from the interactions of cosmic rays with meteorites or planetary surfaces are extensively used to characterize the exposure history of the objects studied. Over the years the focus was mainly on cosmogenic nuclides that are produced by Relatively high energetic projectiles. However, considering the spectra of primary and secondary particles in meteoroids, highest flux densities are reached for epithermal and thermal neutrons. As some of the REE elements have relatively large cross sections for such neutrons, they can produce measurable isotopic shifts. For a few decades such isotopic shifts have been used to study the exposure and gardening history of the lunar regolith and even to search for effects caused by an early active sun

In addition, neutron capture effects sometimes produce a nuisance for stable and radioactive nuclide studies, the effects on the Hf-W dating system being most likely the most prominent ones.. For the Hf-W dating system, neutron capture effects lower the $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ ratio and the too low ratios are then interpreted as too old core formation ages. The effects produced by thermal and epithermal neutron capture reactions have already been modeled for some dating systems detailed discussion of neutron capture effects in various types of meteorites and a consistent modeling of neutron capture effects for a variety of radioactive and stable nuclide systems is still missing.

Here, we present a detailed description of neutron capture effects in carbonaceous chondrites, ordinary chondrites, and iron meteorites with the main focus on iron meteorites. After discussing neutron production and the slowing down of neutrons (moderation), we present neutron capture effects on various stable, i.e., Cd, Sm, Gd, Pd, Pt, Os, and radioactive Hf-W nuclide system.

ZOZNAM PRÁC DIZERTANTA

V karentovaných časopisoch:

1. I. Leya, J. Husár, J. Masarik, Y. Lin a G. J. Wasserburg, The initial $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ in the early solar system, *Meteoritics and Planetary Sciences* (accepted)

Vedecké práce v domácich recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách:

1. J. Husár, J. Masarik, P. Musil, A model for simulation of high-energy nucleon-nucleus collision, *Acta Physica Universitatis Comenianae-New Series*, Vol. 50-51, No. 1&2 (2009-2010), Bratislava : Comenius University Press, 2010 S. 53-65