

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ
KATEDRA DOZIMETRIE A APLIKACE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Prostorová distribuce dávky uvnitř
Mezinárodní kosmické stanice

Autor: Michal Šesták

Vedoucí práce: Ing. Iva Ambrožová, Ph.D.

Praha, 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne

Poděkování

Děkuji Ing. Ivě Ambrožové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za cenné rady a připomínky, které tuto práci obohatily.

Název práce: **Prostorová distribuce dávky uvnitř Mezinárodní kosmické stanice**

Autor: Michal Šesták

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Iva Ambrožová, Ph.D.
Oddělení dozimetrie záření, Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i.,
Akademie věd České republiky

Konzultant: <++>

Abstrakt: Cílem práce bude studovat prostorovou distribuci dávkových veličin na různých místech ISS pomocí kombinace termoluminiscenčních detektorů a detektorů stop v pevné fázi, které byly poustupně umístěny na ISS v posledních několika letech. Student se seznámí s metodikou vyhodnocování detektorů, včetně měření a zpracování dat.

Klíčová slova: <++>

Title: **Dose distribution inside the International Space Station**

Author: Michal Šesták

Abstract: <++>

Key words: <++>

Obsah

Úvod	8
1 Kosmické záření v blízkém okolí Země	9
1.1 Zdroje kosmického záření v blízkém okolí Země	10
1.1.1 Galaktické kosmické záření	10
1.1.2 Zemské radiační pásy	11
1.1.3 Sluneční události s emisí částic	12
1.1.4 Sekundární částice	13
1.2 Faktory ovlivňující kosmické záření v blízkém okolí Země	13
1.2.1 Fáze slunečního cyklu	13
1.2.2 Sklon oběžné dráhy	14
1.2.3 Nadmořská výška	14
1.2.4 Východní/západní anizotropie zachycených protonů	14
1.2.5 Stínění	15
2 Pasivní detektory používané k monitorování kosmického záření	16
2.1 Termoluminiscenční detektory	16
2.2 Detektory stop v pevné fázi	18
2.2.1 Vyhodnocování	20
3 Mezinárodní kosmická stanice	22
3.1 Modul Columbus	23
4 Experimenty DOSIS a DOSIS 3D	25
4.1 Rozmístění pasivních detektorů	26
4.2 Průběh experimentů	26
4.2.1 Vývoj nadmořské výšky a slunečního cyklu	28

4.3	Používané detektory	29
4.3.1	Termoluminiscenční detektory	30
4.3.2	Opticky stimulované luminiscenční detektory	31
4.3.3	Detektory stop v pevné fázi	31
4.3.4	Aktivní detektory DOSTEL	31
4.3.5	Detektory používané NPI	32
4.4	Výsledky	33
4.4.1	Srovnání dat pasivních detektorů v rámci jedné sady	34
4.4.2	Srovnání dat z osmi sad pro jeden pasivní detektor	36
4.4.3	Srovnání dat pasivních a aktivních detektorů	37
5	Vyhodnocení tří detektorů stop v pevné fázi	38
	Závěr	44

Úvod

alskdjfjlkasjdflakdsf asdfkldf

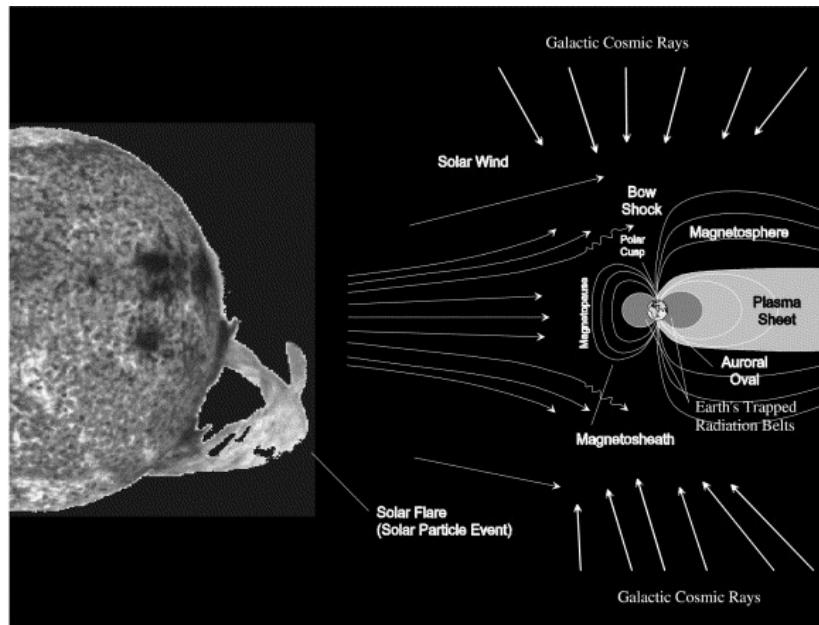
1. Kosmické záření v blízkém okolí

Země

Ionizující záření ve vesmíru je tvořeno širokou škálou primárních částic s velkým rozsahem energií. Tok těchto částic je zpravidla malý. Při průchodu látkou (kosmická loď, povrch ISS a její obsah) vznikají nabité a neutrální sekundární částice, jejichž přítomnost hraje roli při výběru vhodného typu stínění kosmické lodi, vesmírných stanic atp.

Kosmickým zářením v blízkém okolí Země rozumíme ionizující záření v tomto okolí. Na obr. 1.1 vidíme tři hlavní zdroje tohoto ionizujícího záření: (1) galaktické kosmické záření (GCR-galactic cosmic rays), což je proud nabitych částic, které vznikly mimo sluneční soustavu; (2) energetické elektrony a protony zachycené v geomagnetickém poli tvořící radiační pásy Země, též nazývané Van Allenovy pásy (ERB, Earth's radiation belts); (3) sluneční události s emisí částic (SPE, solar particle events), vysoké toky nabitych částic emitovaných během vzácných, ale intenzivních slunečních erupcích (solar flares) nebo výronech koronální hmoty (CME, coronal mass ejections) [1]. Někdy se udávají jako čtvrtá složka albedo neutrony a protony, což jsou sekundární částice vzniklé při interakcích mezi GCR a zemskou atmosférou s trajektorií mířící zpět do vesmíru. Avšak příspěvek albedo částic je malý, a proto se většinou neuvažuje.

V dalším textu nejprve stručně rozebereme jednotlivé zdroje kosmického záření v blízkém okolí Země, poté se podíváme, jaké faktory ho ovlivňují.



Obr. 1.1: Tři hlavní zdroje kosmického záření v blízkosti Země: (1) galaktické kosmické záření, (2) zachycené částice v radiačních pásech Země a (3) sluneční události s emisí částic. Z obrázku je dále zřejmé, že všechny tři zdroje jsou ovlivňovány zemským magnetickým polem. [1]

1.1 Zdroje kosmického záření v blízkém okolí Země

1.1.1 Galaktické kosmické záření

Galaktické kosmické záření se skládá z 98 % z protonů a těžších iontů (baryonová složka), z 2 % z elektronů a pozitronů (leptonová složka). V baryonové složce převládají protony (87%) a alfa částice (12%), zbytek tvoří ionty s protonovým číslem od 3 (Li) do 92 (U) [1]. Důležitou roli ve vesmírné dozimetrii hrají částice s velkým atomovým číslem a velkou energií, jelikož jsou celkem hojně a mají velikou pronikavost.

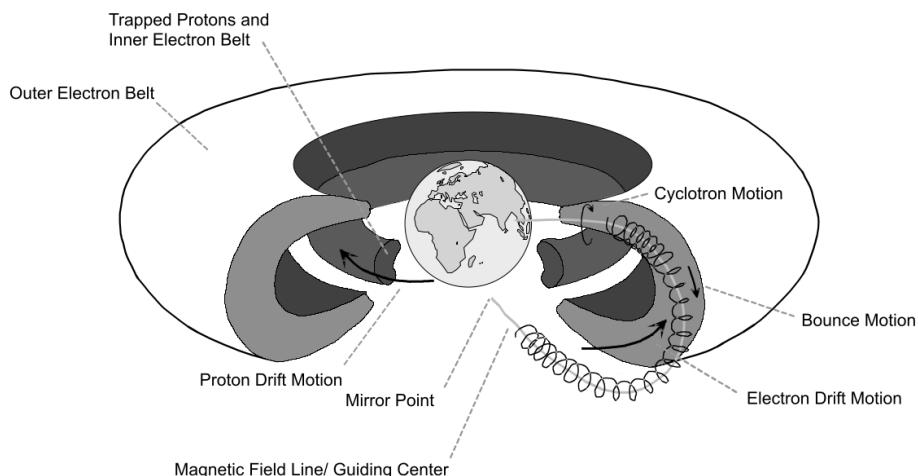
Tok kosmického záření, které vstupuje do sluneční soustavy a zároveň nemá energii větší než cca 1 GeV, je zeslabováno slunečním větrem. Intenzita tohoto zeslabení se odvíjí od jedenáctiletého slunečního cyklu: k největšímu zeslabení dochází při slunečním maximu, naopak při slunečním minimu je zeslabení nejmenší.

Kosmické záření je dále ovlivňováno zemským magnetickým polem. Nabité částicí těhnou ke sledování geomagnetických siločar, které jsou paralelní k zemskému povrchu v oblasti kolem rovníku a do Země se vnořují v oblasti u pólů. Proto je většina částic (až na ty nejvíce energetické) odnášeno pryč od rovníku a u polů jsou propouštěny k povrchu (to je příčinou existence např. polární záře). Z toho vyplývá, že vesmírné lodě

a stanice získávají největší ozáření od GCR blízko pólů.

1.1.2 Zemské radiační pásy

Zemské radiační pásy jsou vrstvy protonů a elektronů rozprostírajících se kolem Země. Tyto částice jsou zachyceny geomagnetickým polem a pohybují se vícero způsoby (obr. 1.2): rotace častic kolem geomagnetickým siločar se nazývá cyklotronový pohyb; vzhledem k nerovnoměrnosti zemského magnetického pole se částice pohybují podél jeho siločar (u pólů mění směr); jako poslední pohyb je udáván drift častic kolem Země (protony driftují na západ a elektrony na východ).



Obr. 1.2: Radiační pásy Země, nabité částice se pohybují třemi způsoby: cyklotronový pohyb, posuvný pohyb podél siločar a driftový pohyb kolem Země. [1]

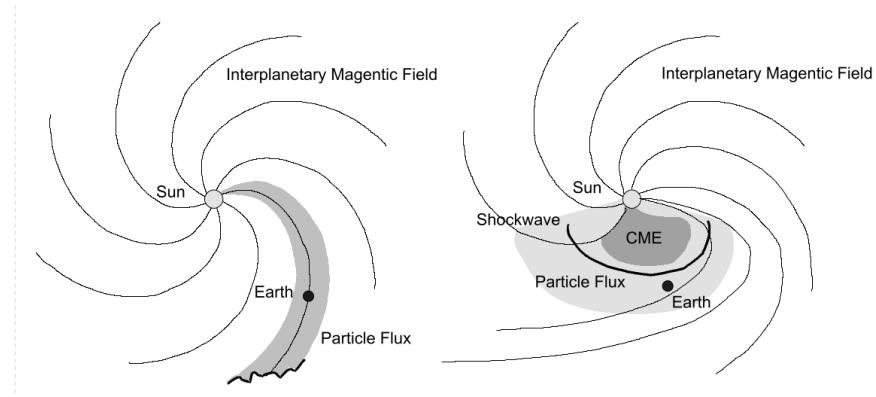
Zachycené elektrony se nacházejí ve dvou vrstvách a vzhledem k jejich převážně nízké energii nepředstavují veliký zdravotní riziko. Zachycené protony se nacházejí v jedné oblasti a jejich intenzita klesá s rostoucí vzdáleností od Země. Jejich energie se pohybuje v řádech od jednotek do stovek MeVů, přičemž maximum nastává při hodnotě z intervalu [150, 250] MeV. Protože se oběžná dráha ISS nachází v menší nadmořské výšce, než ve které je většina zachycených protonů, nepřispívají protony významněji k celkové dávce ISS. Výjimku představuje tzv. jihoatlatická anomálie (SAA, south Atlantic Anomaly), která se rozprostírá nad pobřežím Brazílie; v tomto místě dochází k přiblížení zachycených protonů k zemskému povrchu, což je důsledek netotožnosti geografických a magnetických zemských pólů. Vrstva zachycených protonů zde protíná oběžnou dráhu ISS (a dalších vesmírných projektů); dávku ISS při průchodu SAA (tedy

pro sklon $51,56^\circ$ a nadmořskou výšku cca 400 km oběžné dráhy ISS) tvoří zhruba z poloviny zachycené protony a z poloviny GCR (při větší zeměpisné šířce) [1].

1.1.3 Sluneční události s emisí částic

Tento zdroj ionizujícího záření zahrnuje částice emitované ze slunce během slunečních erupcí nebo výronech koronální hmoty (CME), tj. protony, elektrony a těžší nabité částice (do železa). Sluneční události s emisí částic jsou celkem vzácné a vyskytují se hlavně během slunečního maxima. Během jednoho slunečního cyklu se dá očekávat cca 50 událostí, přičemž jedna či dvě mohou být většího charakteru (fluence protonů je větší než 10^{10} cm^{-2}).

Na obrázku 1.3 vidíme rozdíl mezi sluneční erupcí a CME. Sluneční erupce je krátko žijící, obvykle v řádu hodin, a je charakteristická relativně velkými toky elektronů. Celková fluence je malá, mezi 10^7 a 10^8 cm^{-2} a tyto události jsou omezeny na $30\text{-}40^\circ$ solární délky. Druhý typ SPE, výron koronální hmoty, je déle žijící, přežívá v řádu dnů. Je charakteristická mnohem většími toky protonů, totální fluence může přesáhnout 10^9 cm^{-2} a může se šířit pod širokým úhlem solární délky, od 60° až do 180° [1].



Obr. 1.3: Dva typy SPEs: nalevo je sluneční erupce a napravo CME. [1]

Časový vývoj typické SPE začíná prudkým nárůstem toku, maxima je dosaženo v řádu minut až hodin. Poté dochází k pozvolnému klesání, též v řádu minut až hodin, následované možným druhým maximem, který vzniká, když meziplanetární šoková vlna míjí Zem (v případě CME).

Ovšem k významnějšímu zvýšení dávkového příkonu v blízkém okolí Země od SPE musí být splněno několik podmínek. SPE musí mít velikou celkovou fluenci, dále se musí vyskytnout v takové solární délce, která je propojena se Zemí meziplanetárním

magnetickým polem, a nakonec jí nesmí minout. Dále zde musí být správné podmínky geomagnetického pole, aby částice od SPE nebyly odneseny pryč. Záleží také na nadmořské výšce oběžné dráhy sledovaného kosmického tělesa – pokud totiž leží pod geomagnetickým polem (nebo alespoň nějakou jeho vrstvou), pak je jím chráněno.

1.1.4 Sekundární částice

Většina ztrát energie primárních částic při průchodu látkou je ve formě ionizace, avšak mnoho primárních částic má velkou energii, a proto může část z nich podstoupit jaderné reakce s jádry látky (vesmírná stanice a její obsah), čímž se produkuje sekundární částice. Pokud mají sekundární částice dostatečnou energii, pak mohou stejným způsobem produkovat další částice - to se děje zvláště u vysokoenergetických neutronů.

Důležité jsou dva typy jaderných interakcí: fragmentace terčového jádra a fragmentace projektilu. Při první z nich dochází k rozštěpení terčíku; tato interakce nastává při srážce vysokoenergetické primární nabité částice, obvykle GCR nebo zachyceného protonu, a těžkého jádra, obvykle Al jádra stanice nebo C a O lidského těla. Při druhém typu dochází k rozštěpení nalétavájícího projektilu; tato interakce nastává při srážce těžké nabité částice s terčíkem. V obou případech se produkuje jedna či více sekundárních částic, např. protony, neutrony, α částice, těžká jádra; při druhém typu navíc může dojít ke vzniku většího štěpného fragmentu, který pak odnáší většinu kinetické energie [1].

1.2 Faktory ovlivňující kosmické záření v blízkém okolí Země

1.2.1 Fáze slunečního cyklu

Se zvyšující se solární aktivitou klesají příspěvky od GCR a od protonů zachycených v SAA k celkové obdržené dávce. Je to dáno odklonem ionizujících částic, který je způsoben meziplanetárním magnetickým polem [2].

1.2.2 Sklon oběžné dráhy

Relativní příspěvek GCR a zachycených protonů k celkovému záření, jemuž je vesmírný objekt vystaven v LEO, je ovlivněn inklinací oběžné dráhy stanice/satelitu vzhledem k zemskému rovníku. Pro velké sklony oběžné dráhy (tedy takové, které zanášejí objekt blízko magnetickým polům) převládá složka galaktického kosmického záření, protože GCR částice jsou geomagnetickým polem zanášeny blíže k Zemi a protože průměrný čas zabírající překonání jihoatlatické anomálie je malý ve srovnání s orbitální periodou. Naopak pro malé sklony oběžné dráhy (blízko rovníku) je největším zdrojem záření jihoatlatická anomálie, k čemuž přispívá i geomagnetické pole, jež většinu GCR částic odnáší pryč od rovníku.

1.2.3 Nadmořská výška

Ozáření vesmírného objektu je silně závislé na nadmořské výšce: s rostoucí nadmořskou výškou roste i dávkový příkon; pokud se objekt nachází nad SAA, pak je růst exponenciální (do určitých výšek). Tato závislost je způsobena hlavně protony zachycenými v ERBs; naopak ozáření pocházející od GCR je na nadmořské výšce v podstatě nezávislé [2].

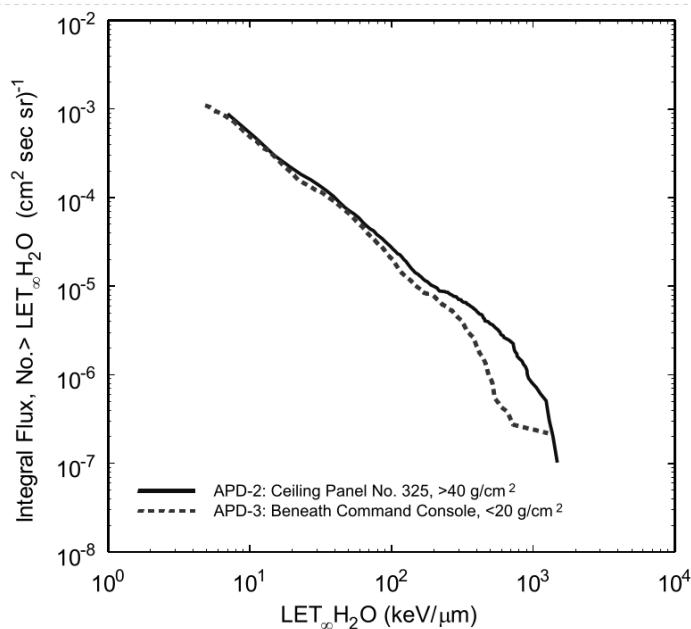
1.2.4 Východní/západní anizotropie zachycených protonů

Tok protonů vstupujících do vesmírného objektu nad SAA je anizotropní: protony pohybující se na východ následují geomagnetické siločáry ležící nad oběžnou dráhou objektu, zatímco protony pohybující se na západ následují geomagnetické siločáry ležící pod oběžnou dráhou objektu. Poloměr cyklotronového pohybu protonů v SAA je přímo úměrný atmosférickému měřítku výšky (atmospheric density scale height); tato veličina je definovaná jako vzrůst v nadmořské výšce, pro který se atmosférický tlak sníží o faktor e [14]. Ona úměrnost je způsobena tím, že protony cestující na západ se pohybují v hustší vrstvě atmosféry a tudíž s větší pravděpodobností interagují s atmosférou, čímž je toto záření utlumeno. Tento jev se projevuje až trojnásobným rozdílem dávkového příkonu mezi západní (do které narážejí protony cestující na východ) a východní (protony cestující na západ) částí objektu [1].

1.2.5 Stínění

Stínění vesmírného objektu představuje jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující charakter záření uvnitř vesmírného objektu. Zvyšením stínění se dosáhne snížení dávkového příkonu uvnitř objektu, avšak na druhou stranu se zvýší jakostní činitel záření Q , tedy potenciální nebezpečnost záření z hlediska zdraví astronautů. Vzrůst Q je dán zpomalením primárních částic ve stínění, které vede ke zvýšení jejich LET (Linear energy tranfer, lineární přenos energie) [12].

Tento jev lze pozorovat např. v měřeních prováděných univerzitou v San Franciscu v letech 1996-1997 na palubě ruské kosmické stanice Mir. Obr. 1.4 zobrazuje dvě LET spektra. Obě dvě byla naměřena detektory stop CR-39, přičemž jeden detektor byl silně stíněn (více než 40 g/cm^2) a druhý slabě (méně než 20 g/cm^2). Pro LET menší než cca $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$ obě jsou spektra velmi podobná, nicméně pro větší hodnoty LET leží spektrum prvního detektoru znatelně výš než spektrum druhého detektoru [1]. To plně odpovídá informacím z prvního odstavce.



Obr. 1.4: Integrální LET spektra měřená na dvou různě odstíněných místech v kosmické stanici Mir v roce 1997 [1]. Plná čára zobrazuje spektrum silně stíněného detektoru, čárkovaná slabě stíněného detektoru.

Ve stínění dále mohou vznikat sekundární částice (ty ale mohou vznikat i uvnitř objektu), které v závislosti na tloušťce stínění mohou, ale nemusejí být pohlceny v samotném stínění; v případě nepohlcení představují taktéž určitý zdravotní risku [1].

2. Pasivní detektory používané k monitorování kosmického záření

Pasivní detektory nepotřebují napájení, jsou dobře skladné (malé rozměry, malá hmotnost) a bezpečné, což je činí vhodnými měřícími prostředky ve vesmíru. Mezi jejich hlavní zápory patří, že nedodávají data v reálném čase a že pro vyhodnocení musí být dopraveny na Zem do příslušné laboratoře [1].

K monitorování kosmického záření se používají detektory založené opticky stimulované luminiscenci (OSLD), termoluminiscenční detektory (TLD) a detektory stop v pevné fázi (TED, nuclear track etched detectors/solid state nuclear track detectors). OSLD se využívají pouze okrajově a tato práce o nich nepojednává.

Výstupem z TLD je dávka, která se absorbovala v detektoru za celý čas měření. Oproti tomu pomocí TED je možné změřit *LET* spektrum v rozsahu, který je rozebrán dále v textu; *LET* je lineární přenos energie. Kombinací dat z TLD a z TED lze určit celkový dávkový ekvivalent [1].

2.1 Termoluminiscenční detektory

Vyhodnocování TLD je založeno na jevu termoluminiscence: při zahřátí na teplotu, která je vlastní pro daný materiál a vyhodnocovací cyklus, se vyzáří světlo, jehož množství je přímo úměrné množství absorbované energie v detektoru. Důležitým pojmem je vyhřívací křivka TLD, což je závislost světelného toku (respektive elektrického signálu z fotonásobiče) na teplotě. Odezva TLD se určí právě z této křivky (např. jako plocha pod křivkou, plocha pod píkem, výška píku [2]) a na základě kalibrační křivky lze dopočítat absorbovanou dávku. Kalibrační křivka se získává ozařováním TLD zdroji se známým dávkovým příkonem. Vzhledem k velké energetické a druhové rozmanitosti kosmického záření je třeba ozařovat dávkami v dostatečném rozsahu.

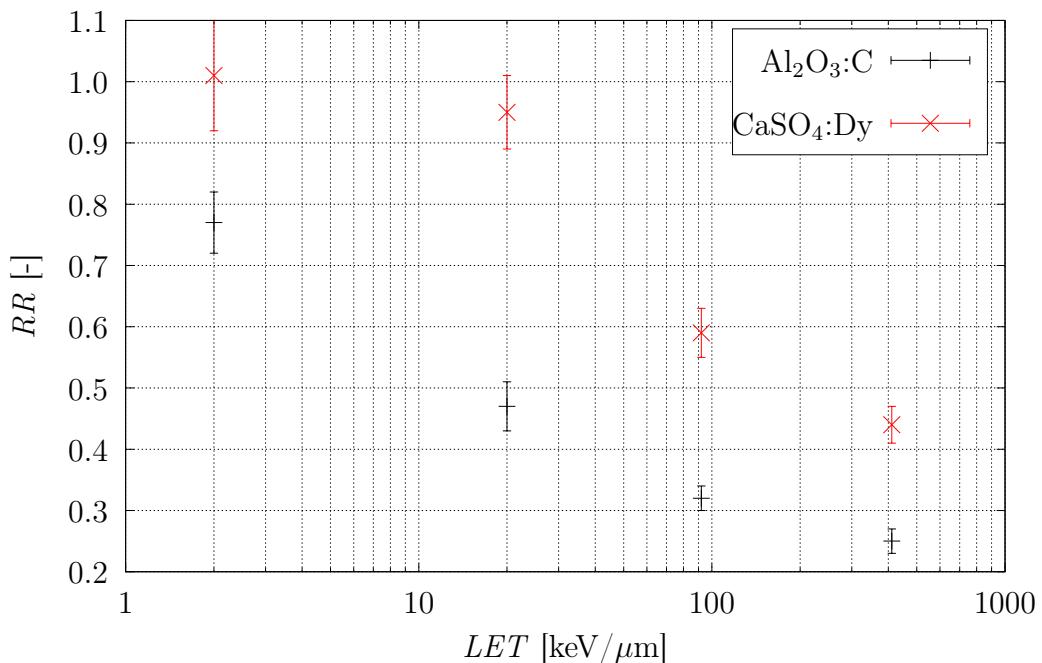
TLD měří spolehlivě částice s LET nižším než cca $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (tato hodnota se liší pro různé materiály), pro vyšší hodnoty LET se účinnost TLD snižuje [3]. Pro lepší popis tohoto jevu se zavádí veličina relativní odezva detektoru RR (relative response)

$$RR = \frac{(TL_{\text{odezva}}/D_{\text{tkáň}})_Y}{(TL_{\text{odezva}}/D_{\text{tkáň}})_{\gamma}}, \quad (2.1)$$

kde $(TL_{\text{odezva}})_Y$, resp. $(TL_{\text{odezva}})_{\gamma}$ je odezva TLD po ozáření dávkou $(D_{\text{tkáň}})_Y$, resp. $(D_{\text{tkáň}})_{\gamma}$, přičemž tyto dávky jsou si číselně rovny. Jinak řečeno RR je definována jako poměr odezev po ozáření stejnou dávkou v tkáni (z níž je TLD vyroben) způsobenou částicemi Y a referenčním zářením γ [4].

Tabulka 2.1: Relativní odezvy RR dvou TL detektorů používaných NPI pro částice s různým LET. Data byla získána při experimentálním ozařování detektorů částicemi se známým LET [4].

Částice	LET [keV/ μm]	Al ₂ O ₃ :C	CaSO ₄ :Dy
He	2, 16	$0,77 \pm 0,05$	$1,01 \pm 0,09$
O	20, 00	$0,47 \pm 0,04$	$0,95 \pm 0,06$
Ar	92, 00	$0,32 \pm 0,02$	$0,59 \pm 0,04$
Fe	411, 00	$0,25 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,03$



Obr. 2.1: Data z tab. 2.1 vynesená do grafu, tj. relativní odezva dvou detektorů používaných NPI pro částice s různým LET.

Na vývoj RR se podíláme u dvou TLD používaných Oddělením dozimetrie záření ÚJF AV ČR (v dalším textu je používána anglická zkratka NPI, Nuclear Physics Institute). Jedná se o detektory $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, které se jmenují podle výrobních materiálů. Tyto detektory byly, resp. jsou používány v experimentech DOSIS a DOSIS3D. V tab. 2.1 jsou hodnoty RR těchto detektorů pro částice s různým LET získané při experimentálním ozařování [4]. Lze pozorovat, že s rostoucím LET relativní odezva u obou detektorů klesá, u $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ mnohem rychleji než u $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$; pro názornost jsou data z tabulky znázorněny i v grafu, viz obr. 2.1. Pro zpřesnění měření je potřeba provést korekci TL odezev, více informací v [4].

2.2 Detektory stop v pevné fázi

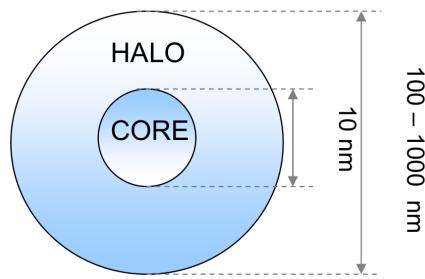
V některých pevných látkách vznikají při ozáření stabilní mikropoškození, tzv. stopy, která mohou být vhodným způsobem zvětšena. Následně lze zvětšené stopy spočítat např. pomocí mikroskopu, přičemž počet stop je úměrný počtu častic, které s materiélem interagovaly. Používají-li se tyto látky jako detektory ionizujícího záření, pak je nazýváme detektory stop v pevné fázi (TED). Z velikosti stop lze určit LET a D (dávka) odpovídající částice a tím i dávkový ekvivalent H . Mezi materiály s touto schopností patří různá skla, minerální krystaly, plasty, z novějších pak i některé kovy, intermetalické sloučeniny a supravodivé oxidy; tento jev byl poprvé pozorován v roce 1958 u krystalů LiF [5].

TED jsou schopné měřit pouze částice s LET vyšším než je určitá prahová hodnota, která je různá pro odlišné materiály. Zároveň v oblasti velkých LET již nelze přesně lineární přenos energie určit, což znamená, že nemůžeme vypočítat dávku a dávkový příkon. Detektor zde slouží maximálně jako čítač impulzů.

Latentní stopy (tj. stopy, které ještě nebyly zvětšeny) jsou nejčastěji zvětšovány chemickým leptáním. Tato metoda vychází z faktu, že poškozené části materiálu se leptají rychleji než nepoškozené. Někdy se používá dvoustupňové (per partes) leptání, které má tu výhodu, že po první fázi jsou zřetelné stopy vytvořené částicemi s krátkým dosahem a s velkým LET , které by při jednostupňovém leptání byly odstraněny, a po druhé fázi naopak lze identifikovat stopy vytvořené částicemi s malým LET , čímž se významně zvýší rozsah detekovatelných částic [25].

Tvorba latentních stop není doposud plně pochopena. U anorganických materiálů

se jej snaží vysvětlit např. mechanismus popsaný v [6]. U organických materiálů je proces tvorby stop rozdělen do tří fází: fyzikální, fyzikální-chemická a chemická. Při první fázi ztrácí částice v materiálu energii (excitacemi a ionizacemi elektronů z obalu terčíků, vyražením terčíku z polymerové vazby, brzdným zářením v případě velké rychlosti částice). Při druhé fázi dochází k interakcím částic vzniklých v první fázi, které vyúsťují ke vzniku latentních stop; latentní stopa se skládá z jádra o průměru cca 10 nm a obalu <+??+> o průměru odpovídající dosahu delta elektronů, viz obr. 2.2. Poslední fáze představuje leptání, při němž jsou stopy neznámým způsobem zafixovány a zvětšeny.



Obr. 2.2: Latentní stopa v organickém materiálu se skládá z jádra (CORE) a z obalu (HALO). [9]

Důležitou roli při tvorbě stop v plastech hráje kyslík. Bylo dokázáno, že při jeho absenci jsou stopy menší [7].

Tabulka 2.2: Charakteristiky různých materiálů CR-39, které jsou nebo byly používány NPI. LET nasycení udává hodnotu, při které přestává mít smysl měřit lineární přenos energie. [9]

Materiál	Tloušťka [mm]	LET práh [keV/ μ m]	LET nasycení [keV/ μ m]
Page	0,5	10	440
TASTRAK	0,5	20	450
USF4	0,6	8	460
HARZLAS TD-1	0,8	9	340
Baryotrac	0,9	30	>700

Nejpoužívanějším TED materiálem je poly allyl diglykoluhličitan <++?++>, který bývá často také nazýván CR-39 (zkratka původního výrobního jména Columbia Resin #39 [8]). Jako detektor stop v pevné fázi se začal používat ke konci 70. let 20. století [9]; ve vesmírné dozimetrii byl poprvé použit při prvním letu amerických raketoplánů Space Shuttle v roce 1981 [1]. Původní CR-39 schopen detektovat částice s LET vyšším

než 5 cca keV/ μm [1]. V současné době je vyráběn pod různými jmény a s různými úpravami; také do něho bývají přidány další přísady, které mají zlepšit jeho vlastnosti. Naneštěstí některé úpravy ovlivňují i účinnost detekce částic s menším *LET*, což jinými slovy znamená zvýšení detekčního prahu. V tab. 2.2 je srovnání *LET* rozsahu různých CR-39 materiálů, které jsou nebo byly někdy v minulosti používané NPI.

Informace z tohoto oddílu byly brány z [9].

2.2.1 Vyhodnocování

Důležitou charakteristikou leptání je tzv. poměr leptacích rychlostí, definovaný vztahem

$$V = \frac{V_M}{V_S}, \quad (2.2)$$

kde V_M je rychlosť leptání nepoškozeného materiálu a V_S rychlosť leptání poškozeného materiálu, tj. stopy. Z provedených experimentů se ukazuje, že V_S je konstantní u stop vytvořených částicemi s velkým dosahem, avšak např. u stop vytvořených sekundárními částicemi konstantní není [10]. My jej však budeme obecně brát konstantní, protože tímto způsobem je vyhodnocována většina TED. Z poměru leptacích rychlostí lze z experimentálně zjištěného vztahu určit *LET* částice, jež stopu vytvořila. Nejprve si tedy ukážeme, jak zjistit V .

Po leptání detektoru jsou stopy analyzovány. K tomu se např. používá mikroskop s kamerou, která nasnímá povrch detektoru. Zvětšení je takové, aby stopy byly snadno rozpoznatelné. Poté mohou být snímky dále zpracovány v příslušném programu, který stopy bere jako elipsy; osy všech elips (hlavní osa a , vedlejší osa b) jsou výstupem programu. Poměr leptacích rychlostí může být určen z hodnot a, b pro každou stopu ze vztahu

$$V = \frac{\sqrt{(1 - B^2)^2 + 4A^2}}{1 - B^2}, \quad (2.3)$$

kde

$$A = \frac{a}{2V_M t},$$

$$B = \frac{b}{2V_M t}$$

a t je doba, po kterou se leptalo, tj. $d = V_M t$ je tloušťka odleptané vrstvy nepoškozeného materiálu; vztahy byly převzaty z [10]. Existuje více metod zjištění d . Je možné přímo měřit hodnoty tlouštěk materiálu před a po leptání a poté je odečíst. Mnohem přesnější

je např. skoková metoda, kdy je část detektoru pokryta pryskyřicí, díky čemuž není tato část odleptána a posléze je možné měřit rozdíl mezi touto a odleptanou částí; další metody jsou popsány v [9].

Kalibrační křivka, neboli vztah mezi V a LET , je určena experimentálním ozařováním příslušného TED. Pro proklad naměřených dat se většinou používá polynom třetího stupně. Je důležité poznamenat, že od určitých hodnot je LET konstantní, tedy že by mělo docházet k nasycení kalibrační křivky, a proto v případě polynomu 3. stupně nelze křivku extrapolovat do vzdálenějších hodnot od naměřených bodů.

Veličina $\theta_k = 1/V$ je nazývaná kritický úhel a vyjadřuje minimální úhel dopadu částice na detektor, při němž je stopa stále ještě po leptání zřetelná, tj. není leptáním odstraněna. Počet detekovaných částic na plochu N je třeba opravit na částice, které dopadly pod menším úhlem než θ_k ; to se provede vynásobením koeficientem

$$k_\theta = \frac{V^2}{V^2 - 1}, \quad (2.4)$$

tedy $N^{\text{kor}} = N \cdot k_\theta$.

Celková absorbovaná dávka D a dávkový ekvivalent H můžeme určit ze vztahů

$$D = \int \text{konst} \cdot LET \frac{dN^{\text{kor}}}{dLET} dLET, \quad (2.5)$$

$$H = \int \text{konst} \cdot LET \cdot Q(LET) \frac{dN^{\text{kor}}}{dLET} dLET, \quad (2.6)$$

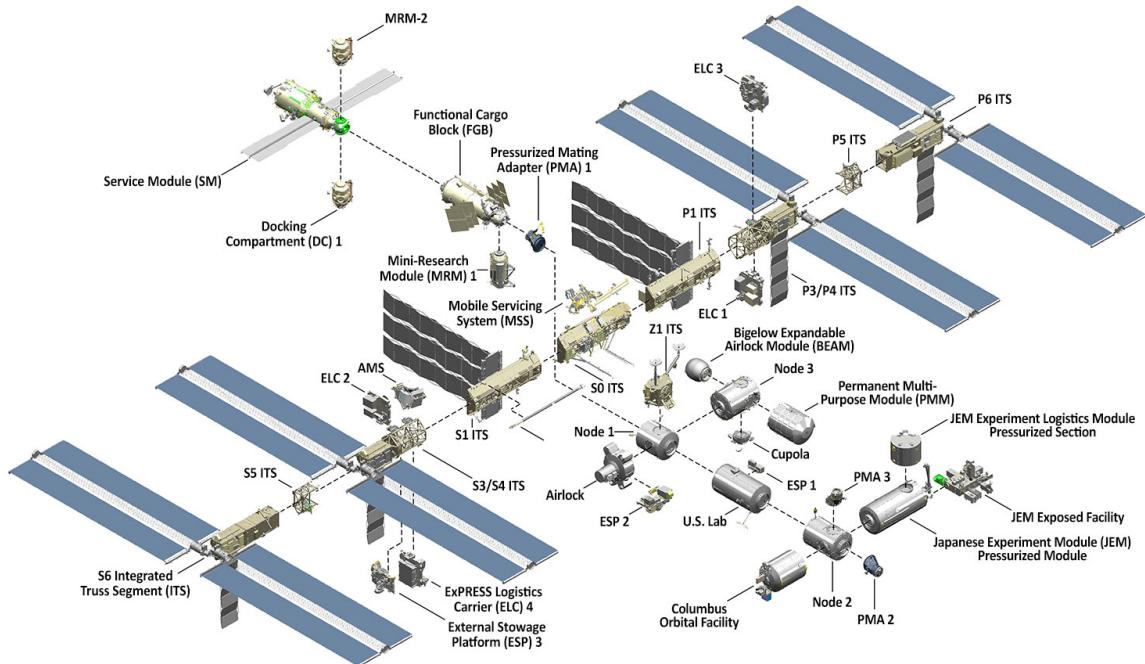
kde $\frac{dN^{\text{kor}}}{dLET}$ je opravený počet částic na plochu mající LET v intervalu $dLET$; Q je jakostní faktor určený podle tab. 2.3 a $\text{konst} = 1,602 \cdot 10^{-6}$ je převodní konstanta. Vztah byl převzat z [9].

*Tabulka 2.3: Hodnoty jakostního faktoru Q v závislosti na LET . ICRP 60, 1991
<++?++>*

LET [keV/ μm]	$Q(LET)$
<10	1
[10; 100]	$0,32LET - 2,2$
>100	$300/\sqrt{LET}$

3. Mezinárodní kosmická stanice

Mezinárodní kosmická stanice (ISS, International Space Station) je družice lidského původu nacházející se v blízkém okolí Země. Obíhá Zemi na orbitě se sklonem dráhy 51° [17] v nadmořské výšce oscilující kolem 400 km rychlostí 28 800 km/h, což znamená, že celou Zem obletí každých 90 min [18]. Konstrukce stanice započala v roce 1998, od listopadu 2000 je permanentně obývána lidmi. Od roku 2009 je posádka šestičlenná, přičemž po šesti měsících se obměňují zpravidla dva její členové [17]. Při konstrukci stanice byly značně využívány americké raketoplány Space Shuttle, které se po dokončení stanice v roce 2011 přestaly používat. V současnosti je zásobování stanice obstaráváno ruskými kosmickými loděmi Soyuz.



Obr. 3.1: Struktura Mezinárodní kosmické stanice [15]. Modul Columbus je dole uprostřed.

Na obr. 3.1 je vidět struktura stanice. Páteří stanice je téměř 100 m dlouhý nosník, tzv. Integrated Truss Structure, ke kterému jsou připojeny fotovoltaické panely, moduly

ISS a další části. Stanice byla postavena postupným skládáním přímo na orbitě, což si vyžádalo desítky kosmických letů. Zatím poslední připojená část BEAM (Bigelow Expandable Activity Module, nafukovací modul) byla vynesena na orbitu v roce 2016 [16]. V tab. 3.1 jsou k dispozici základní parametry stanice.

Tabulka 3.1: Základní parametry ISS [15].

Délka obyvatelné části (s atmosférou)	73 m
Délka hlavního nosníku	109 m
Délka solárních panelů	73 m
Hmotnost	419 725 kg
Obytný objem	388 m ³ (bez zahrnutí navštěvujících vozidel)
Objem pod tlakem	916 m ³ (s BEAM modulem 932 m ³)
Zdroj energie	8 solárních panelů (84 kW)

Stanice je rozdělena na ruskou a americkou část. Zatímco ruská podléhá výhradně Rusům, americká se skládá z modulů a konstrukcí evropských, japonských, kanadských a amerických. ESA (European Space Agency, Evropská kosmická agentura) je zodpovědná za modul Columbus a za ATV (Automated Transfer Vehicles, automatické transportní vozidla) [19]; podle dohod s NASA má ESA nárok na 51% využití zdrojů modulu Columbus [17].

ISS bude provozována minimálně do roku 2024 [21] a celkové náklady na vybudování, provoz stanice do tohoto roku, výzkum atd. jsou odhadovány na 100 miliard eur, z nich cca 8 miliard je či bude hrazena ESA, resp. jejími 10 členskými zeměmi podílející se na programu (Belgie, Dánsko, Francie, Neměcko, Itálie, Nizozemí, Norsko, Španělsko, Švédsko and Švýcarsko) [20].

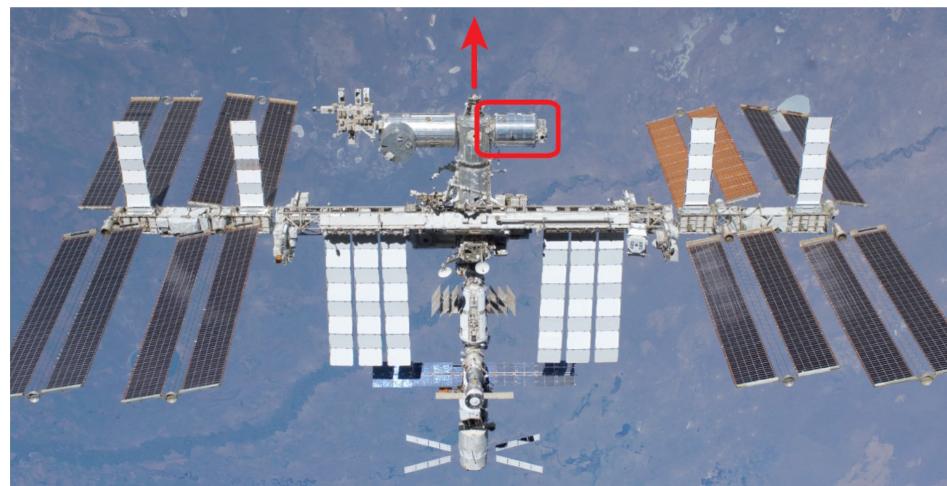
3.1 Modul Columbus

Modul Columbus je největším příspěvkem ESA k ISS.

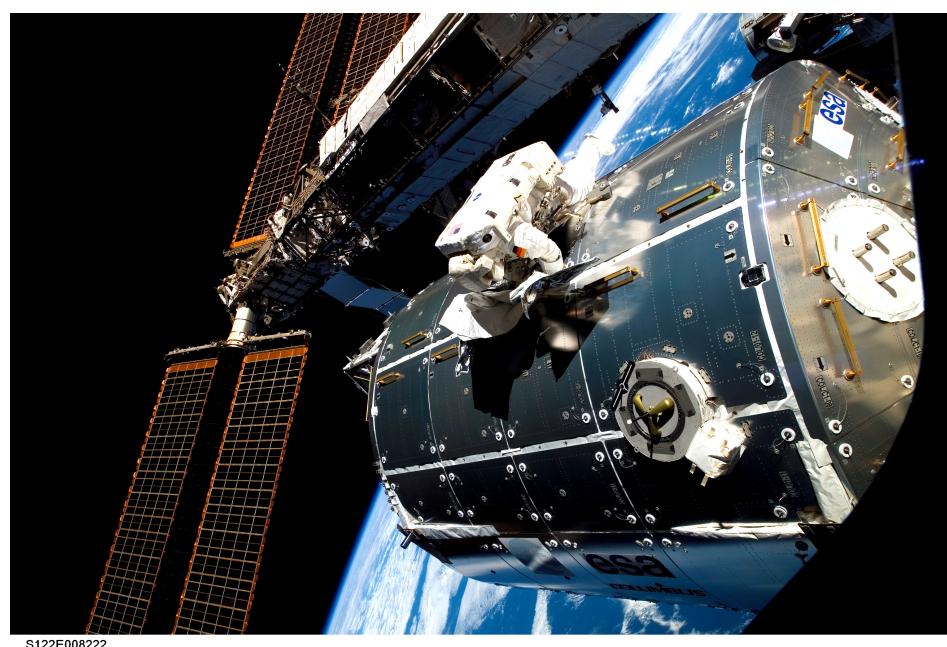
Jedná se o laboratorní modul zaměřený na výzkum v biologii, materiálových vědách, fyziku tekutin a další výzkumy v mikrogravitaci. Obsahuje deset skříňových modulů pro experimenty (International Standard Payload Racks), každý z nich poskytuje nezávislé ovládání energie, chlazení a také komunikaci s pozemními dispečery a vědci. Navíc na vnější straně laboratoře jsou čtyři plošiny, na které jdou umístit vědecké přístroje. Modul

je 7 m dlouhý, jeho průměr činí 4,5 m a váží 10 300 kg (vše jsou přibližné hodnoty). [24].

Právě v tomto modulu probíhal experiment DOSIS a v současnosti běží experiment DOSIS3D.



Obr. 3.2: Poloha modulu Columbus v rámci ISS je vyznačena červeně; červená šipka zobrazuje směr letu ISS [2].



Obr. 3.3: Modul Columbus ve srovnání s astronautem [23].

4. Experimenty DOSIS a DOSIS 3D

Informace v této kapitole byly čerpány převážně ze zdrojů [2, 11].

Experiment DOSIS (Dose Distribution Inside the ISS, distribuce dávky uvnitř ISS) probíhal v letech 2009-2011, experiment DOSIS3D probíhá od roku 2012. Jejich cílem je vyšetření prostorové distribuce dávky v modulu ISS Columbus a získání dat, která by vedla k vytvoření 3D modelu rozložení dávek/dávkového ekvivalentu.

Na experimentech se podílí řada institucí z různých zemí, jejich přehled je v tab. 4.1. Hlavním koordinátorem je DLR. MTA EK byla v průběhu experimentu přejmenována na AERI, v této práci je využívána původní zkratka.

Tabulka 4.1: Organizace podílející se na experimentech DOSIS a DOSIS3D. [2]

German Aerospace Center (DLR), Institute of Aerospace Medicine, Linder Höhe, 51147 Köln, Germany

Christian Albrechts Universität zu Kiel (CAU), Christian-Albrechts-Platz, 24118 Kiel, Germany

Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences (IFJ), PL-31342 Krakow, Poland

International Atomic Energy Agency (IAEA), Division of Radiation, Transport and Waste Safety, 1400 Vienna, Austria

Technische Universität Wien, Atominstitut (ATI), Stadionallee 2, 1020 Vienna, Austria

EGB MedAustron, Marie-Curie-Straße 5, 2700 Wiener Neustadt, Austria

Centre for Energy Research, (MTA EK/AERI), Konkoly Thege ut 29-33, 1121 Budapest, Hungary

Nuclear Physics Institute of the CAS (NPI), Department of Radiation Dosimetry, Na Truhlarce 39/64, 180 00 Prague, Czech Republic

Belgian Nuclear Research Center (SCK·CEN), Boeretang 200, 2400 Mol, Belgium

NASA, Space Radiation Analysis Group (NASA/SRAG), Houston, TX 77058, USA

Leidos, Exploration & Mission Support, 2400 NASA Pkwy, Houston, TX 77058, USA

Physics Department, Oklahoma State University (OSU), Stillwater, OK 74078, USA

National Institute of Radiological Sciences (NIRS), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 4-9-1 Anagawa, Inage, 263-8555 Chiba, Japan

OHB System AG, Universitätsallee 27-29, 28359 Bremen, Germany

Měření byla, respektive jsou prováděna pasivními a aktivními detektory, které jsou

pevně umístěny v modulu Columbus. Pasivní detektory zajišťují určení prostorové distribuce dávky a dlouhodobého vývoje pole záření, aktivní naopak slouží k určení změn pole záření v čase. V případě aktivních detektorů se jedná o dva detektory DOSTEL (DOSimetry TELEscope). V dalším textu se budeme zabývat pouze pasivními detektory.

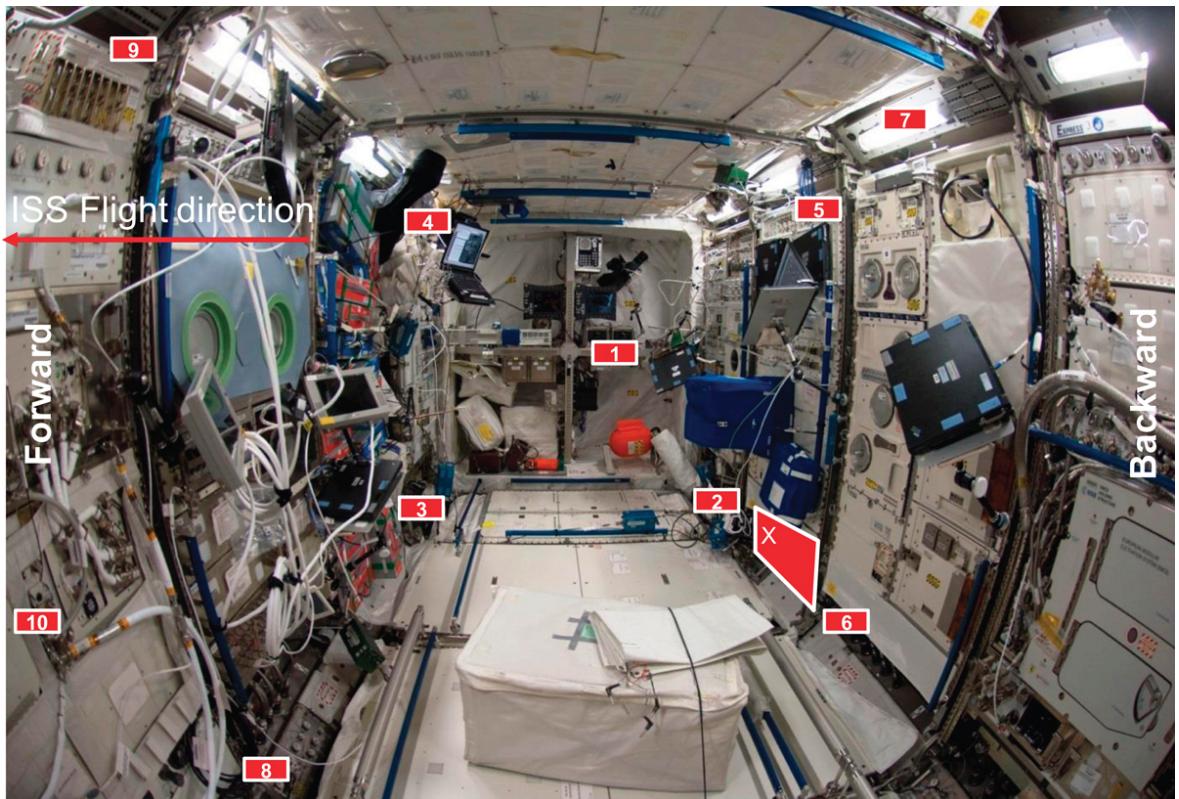
4.1 Rozmístění pasivních detektorů

V rámci experimentu DOSIS, resp. DOSIS3D je v modulu Columbus rozmístěno jedenáct PDP (Passive Detector Packages, balíčky pasivních detektorů), které obsahují termoluminiscenční detektory (TLD), detektory využívající optickou stimulaci (OSLD) a detektory stop v pevné fázi (TED). Na obr. 4.1 vidíme rozmístění PDPs; pět z nich je umístěno na čelní stěně, dalších šest na zadní stěně. Jedenáctý balíček označený symbolem X, též označovaný jako Triple PDP (trojity PDP), je umístěn blízko aktivních detektorů a pokrývá větší plochu než ostatní PDPs. Osm PDPs je umístěno ve skříňových modulech (viz oddíl 3.1); více informací o umístění pasivních detektorů je k dostání v [2].

4.2 Průběh experimentů

Experiment DOSIS probíhal mezi lety 2009 a 2011. Doba trvání experimentu DOSIS3D byla původně stanovena na rozmezí let 2012-2016, avšak v roce 2016 byla prodloužena a experiment stále běží. V rámci těchto experimentů bylo v modulu Columbus zatím k dnešnímu datu (13. 5. 2017) postupně upevněno 10 sad pasivních detektorů (DOSIS – dvě sady, DOSIS3D – devět sad) a na květen/červen 2017 se plánuje upevnění jedenácté. Každá sada obsahovala výše zmíněných 11 PDPs. V tab. 4.2 je vidět časový vývoj v obměně prvních osmi sad a aktivních detektorů (ty byly u obou experimentů pouze dva, DOSTEL-1 a DOSTEL-2), tab. 4.3 pak obsahuje podrobnější informace o pasivních detektorech (dopravení na ISS, instalaci, doba používání, ukončení měření, návrat na Zem, nadmořská výška); sady 7, 8, 9 experimentu DOSIS3D jsou stále vyhodnocovány, proto u nich není v tabulce údaj o nadmořské výšce; sada 10 není zatím vyhodnocena vůbec.

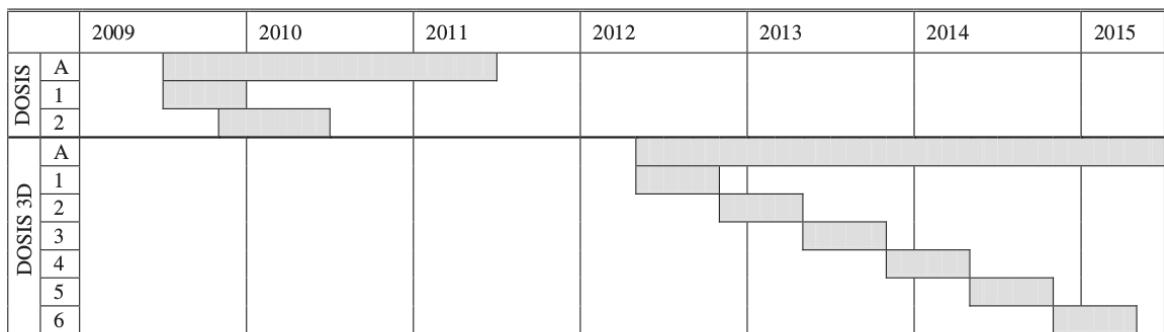
První z experimentů započal 15. července 2009 startem raketoplánu Endeavor,



Obr. 4.1: Rozmístění jedenácti balíčků s pasivními detektory v modulu Columbus; jedenáctý je označen symbolem X a v jeho blízkosti jsou umístěny i aktivní detektory. Obrázek dále obsahuje šipku ukazující směr letu. [2]

na jehož palubě byla první sada pasivních detektorů spolu s aktivními detektory DOSTEL-1,2. Jeho část skládající se z měření pasivními detektory skončila 26. května 2010 návratem druhé sady. Experiment DOSIS3D započal 15. května 2012 startem lodi Soyuz 30S.

Tabulka 4.2: Vývoj experimentů DOSIS a DOSIS3D v čase. Číslo na svíslé ose označuje n-tou sadu pasivních detektorů, písmeno A značí aktivní detektor. [2]



Note. A = active measurements; DOSIS 1 and 2 = passive measurement phases; DOSIS 3D 1–6 = passive measurement phases.

Tabulka 4.3: Časový vývoj používaných sad pasivních detektorů. Tabulka dále obsahuje dobu, kterou daná sada strávila na misi (tj. od startu do návratu na Zem), v závorce je doba, po kterou pasivní detektory měřily; pokrytí je podíl těchto dvou dob. Poslední sloupec obsahuje rozmezí nadmořské výšky, ve které se ISS v daný časový úsek nacházela [2]. Sady 7, 8 a 9 experimentu DOSIS3D nebyly ještě zcela vyhodnoceny (květen 2017), sada 10 nebyla téhož experimentu nebyla vyhodnocena vůbec.

	Sada	Počátek-konec	Doba trvání [dny]	Pokrytí [%]	Nadmořská výška ISS [km]
DOSIS	1	Červenec 2009- Listopad 2009	136 (127)	93,3	339-348
	2	Listopad 2009- Květen 2010	191 (178)	93,2	337-349
DOSIS3D	1	Květen 2012- Září 2012	125 (113)	90,4	397-417
	2	Říjen 2012- Březen 2013	144 (137)	95,1	407-416
DOSIS3D	3	Březen 2013- Září 2013	167 (156)	93,4	407-416
	4	Září 2013- Březen 2014	167 (156)	93,4	413-418
DOSIS3D	5	Březen 2014- Září 2014	170 (161)	94,4	407-416
	6	Září 2014- Březen 2015	167 (161)	96,4	413-418
DOSIS3D	7	Březen 2015- Prosinec 2015	259 (256)	98,8	
	8	Prosinec 2015- Červen 2016	186 (180)	96,8	
DOSIS3D	9	Červenec 2016 Říjen 2016	115 (109)	94,8	

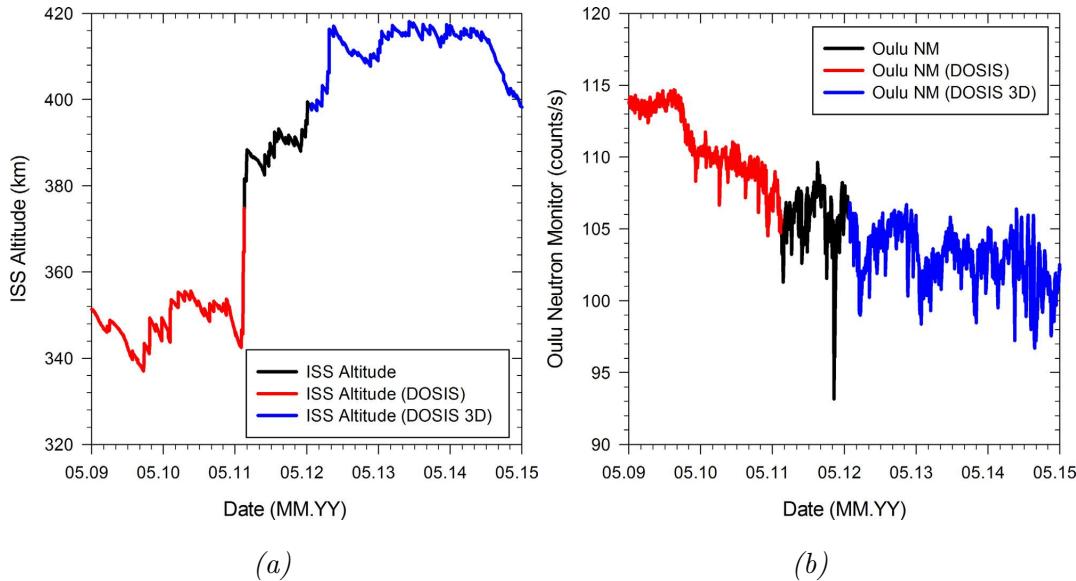
4.2.1 Vývoj nadmořské výšky a slunečního cyklu

Naměřená data jsou ovlivněna řadou parametrů. Nadmořská výška a fáze slunečního cyklu jsou jedny z nejvýznamnějších.

Na obr. 4.2a je znázorněn časový vývoj nadmořské výšky ISS. Pro DOSIS nadmořská výška nabývala hodnot z intervalu [337, 375] km, pro DOSIS3D nabývala hodnot z intervalu [398, 417] km. V obrázku lze vypozorovat prudký nárůst z cca 340 km do 375 km, který se udál ke konci experimentu DOSIS; tehdy již měřily pouze aktivní detektory. Změna nadmořské výšky ovlivňuje ozáření stanice (viz oddíl 1.2.3).

Z informací v oddílu 1.2.1 plyne, že za slunečního maxima je obdržená dávka

nejmenší a naopak za slunečního minima největší (za předpokladu stálosti ostatních parametrů ovlivňujících velikost obdržené dávky). To je znázorněno na obr. 4.2b, kde je zobrazena závislost četnosti detekovaných neutronů na čase (počet detekovaných neutronů klesá s rostoucí sluneční aktivitou). Experiment DOSIS probíhal za slunečního minima (2009 až 2011) a naopak experiment DOSIS3D probíhal za slunečního maxima, které nastalo v letech 2013 a 2014.



Obr. 4.2: V (a) je časový vývoj nadmořské výšky ISS: červeně je vyznačen vývoj v rámci DOSIS, modře v rámci DOSIS3D; černě je označen vývoj nadmořské výšky v době, kdy neprobíhal žádný z experimentů. V (b) je naměřená četnost Oulu neutronovým monitorem, značení je stejné jako v (a); klesající vývoj četnosti impulzů značí rostoucí sluneční aktivitu. [2, 26]

4.3 Používané detektory

Tento oddíl pojednává o používaných detektorech v experimentech DOSIS a DOSIS3D. Podrobnější informace o pasivních detektorech (např. jak se určuje absorbovaná dávka a dávkový ekvivalent z naměřených dat; srovnání jednotlivých typů pasivních detektorů) jsou v kapitole 2. O aktivních detektorech tato práce nepojednává, podrobnější informace lze dohledat v [13, 11].

V experimentech DOSIS a DOSIS3D jsou používány následující tři typy pasivních detektorů: termoluminiscenční detektory (TLD), opticky stimulované luminiscenční

detektory (OSLD) a detektory stop v pevné fázi (TED). V aktivní složce měření je využívána detektorová jednotka DOSTEL.

Na konci tohoto oddílu je podrobný přehled detektorů, které používá NPI, tj. Ústav jaderné fyziky AVČR, oddělení dozimetrie záření.

4.3.1 Termoluminiscenční detektory

Používané TL detektory jsou v tabulce 4.4. Ta obsahuje název instituce spolu s názvy a materiály TLD, které jsou danými institucemi používány. Avšak to pro důkladný popis daného TL detektoru nestačí. Je potřeba dodat následující parametry: čtecí systém (jímž jsou detektory vyhodnocovány), jak dlouho a při jaké teplotě probíhá annealing, rychlosť zahřívání, zda-li se detektor před vyhodnocením předeheřívá, rychlosť chlazení, kalibrační metoda a zdroj, vyhodnocení vyhřívací křivky. Lomítko v názvu TLD (v tab. 4.4) značí dva různé TLD lišící se pouze nuklidem v materiálu: TLD-600 a MTS-6 je označení pro $^6\text{LiF:Mg,Ti}$; TLD-700 a MTS-7 pro $^7\text{LiF:Mg,Ti}$; MCP-6 pro $^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$; MCP-7 pro $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$.

Tabulka 4.4: TL detektory používané různými institucemi.

Institut	Název TLD	Materiál TLD
DLR	TLD-600/700	LiF:Mg,Ti
	TLD-300	$\text{CaF}_2:\text{Tm}$
ATI	TLD-600/700	LiF:Mg,Ti
	TLD-300	$\text{CaF}_2:\text{Tm}$
IFJ	MTS-6/7	LiF:Mg,Ti
	MCP-7	LiF:Mg,Cu,P
SCK·CEN	MTS-6/7	LiF:Mg,Ti
	MCP-6/7	LiF:Mg,Cu,P
MTA EK	MTS-6/7	LiF:Mg,Ti
	NIRS	LiF:Mg,Ti
NASA/SRAG	TLD-100	LiF:Mg,Ti
	TLD-300	$\text{CaF}_2:\text{Tm}$
NPI	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$
	$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

4.3.2 Opticky stimulované luminiscenční detektory

Detektory založené na opticky stimulované luminiscenci využívají následující instituce: OSU, SCK·CEN, NASA/SRAG, NIRS. Jsou vyrobené z jednoho materiálu ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$), avšak liší se v následujících parametrech: čtecí systém, příkon energie působící na na centimetr čtvereční detektoru, filtr, doba stimulace, kalibrační metoda a kalibrační zdroj, vyhodnocení OSL křivky. Všechny tyto parametry jsou pro detektory od jednotlivých institucí v tab. 6 v [2].

4.3.3 Detektory stop v pevné fázi

Všechny používané detektory stop v pevné fázi jsou CR-39. V tab. 4.5 jsou uvedeny instituce, které TED využívají; tabulka také obsahuje výrobce daného TED. Důležitými parametry jsou: doba leptání; teplota, při níž leptání probíhá; koncentrace NaOH, jímž se leptalo; odleptaná vrstva; analyzovaná plocha.

Tabulka 4.5: Přehled institucí používající TED, u každé instituce jsou uvedeny výrobci příslušného detektoru.

Institut	Výrobce/Jméno TED
DLR	ATP
MTA EK	TASTRAK
NPI	HARZLAS TD-1
IPF	TASTRAK
NIRS	HARZLAS TD-1 TechnoTrak
NASA/SRAG	ATP

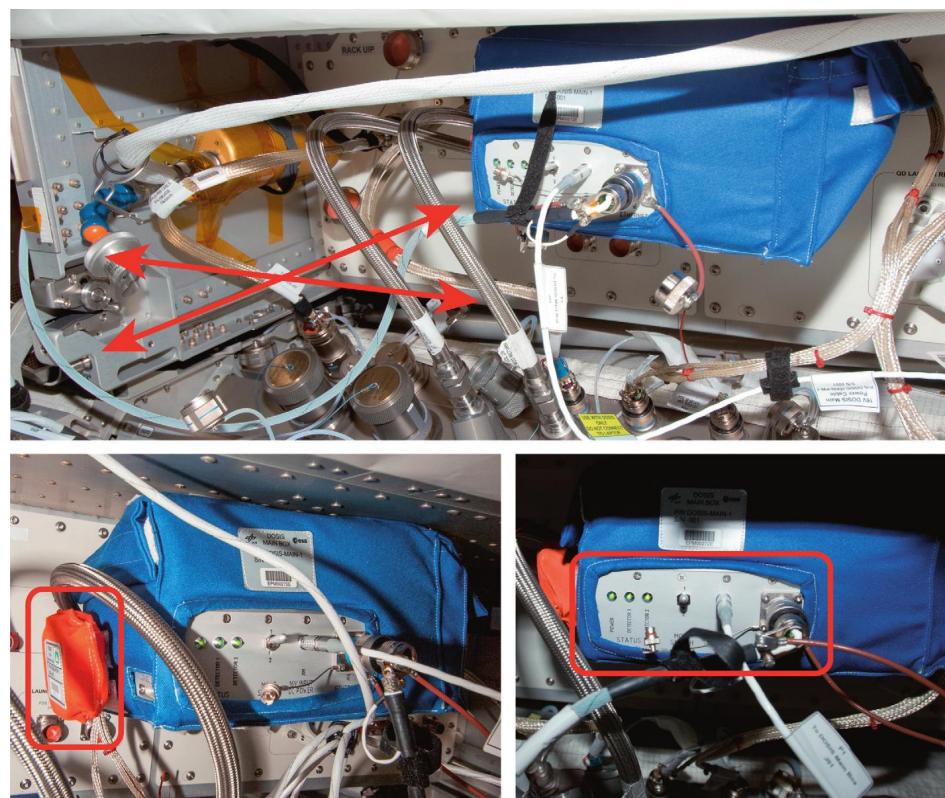
4.3.4 Aktivní detektory DOSTEL

Detektorová jednotka DOSTEL se skládá z dvou křemíkových planárních detektorů s plochou $6,94 \text{ cm}^2$ a tloušťkou $315 \mu\text{m}$. Tyto detektory jsou od sebe vzdálené 15 mm a jsou nastaveny ve stejné geometrii jako teleskop. Jednotka může pracovat buď v dávkovém módu (“dose mode”), nebo v teleskopickém /LET módu. V prvním případě se měří četnost nárazů a dávkový příkon, v druhém LET (při náhodném nárazu do obou detektorů se měří délka doletu částice). Z naměřených dat lze určit absorbovanou

dávku a dávkový ekvivalent. DOSTEL dokáže zaznamenávat částice s *LET* v rozsahu 0,5–400 keV/ μm [13].

V modulu Columbus jsou nainstalovány dvě jednotky DOSTEL v navzájem kolmém směru, což umožňuje získat informace o směrovosti pole záření v modulu. Navíc díky dlouhodobosti měření DOSTEL detektory je možné studovat změny v ozáření během jedenáctiletého slunečního cyklu.

Na obrázku 4.3 je mimo jiné vidět DOSTEL. Informace v tomto oddíle byly brány z [2, 13].



Obr. 4.3: V horním obrázku je vidět modrý box, v němž jsou umístěny oba dva DOSTEL detektory; šipky ukazují namíření detektorů. Vlevo dole je vidět označený PDP připojený v blízkosti aktivních detektorů, vpravo dole je ukázáno ovládání jednoho DOSTELu. [11]

4.3.5 Detektory používané NPI

NPI používá dva TL detektory, $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Oba dva jsou vyhodnocovány pomocí čtecího systému RA'94 (THORN EMI 9789 QB)+TOLEDO 654 TLD Reader; rychlosť zahřívání u obou je rovna $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$; první není předehříván, druhý je předehříván na $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (22 s); annealing probíhá 20 minut za $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$), respektive 10 minut za $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\text{CaSO}_4:\text{Dy}$); ochlazovací rychlosť je vysoká u obou; kalibrování probíhá u

obou pomocí ^{137}Cs ; u obou je vyhodnocována plocha pod vyhřívací křivkou. Oba dva mají průměr roven 5 mm a tloušťku rovnou 1 mm.

Z TED používá NPI HARZLAS TD-1 a od roku 2016 i TASTRAK. HARZLAS TD-1 je leptán 18 hodin za teploty $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ v 5 N koncentrovaném roztoku NaOH; odleptaná vrstva je tlustá $15,3\text{ }\mu\text{m}$. Celkově je analyzována plocha o velikosti $0,09\text{ cm}^2$. Detektor je tlustý 0,9 mm. TASTRAK se leptá dvoufázově: první fáze trvá 6 hodin a jsou při ní zobrazeny stopy vytvořené částicemi s velkým *LET*; při druhé fázi, která trvá dalších 9 hodin, se zobrazí i stopy pocházejících od častic s nižším *LET*. Celkový čas leptání je tedy 15 hodin. Buď se postupuje postupným leptáním (6 hodin leptání, vyhodnocení, 9 hodin leptání, vyhodnocení), nebo se část detektoru leptá 6 hodin a část 15 hodin, tudíž detektor lze vyhodnotit najednou. Detektor se leptá při $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ v 6,25 N koncentrovaném roztoku NaOH, odleptaná vrstva je tlustá $7,5/20,1\text{ }\mu\text{m} <++?++>$; analyzuje se plocha o velikost $0,5\text{ cm}^2$ (v obou případech). Po leptání následuje u obou detektorů nasnímání stop lineárním snímacím zařízením s vysokým rozlišením (které je součástí mikroskopu HSP-1000, [27]), poté jsou snímky se stopami analyzovány programem HspFit.

TASTRAK původně využívaný pouze MTA EK začíná být používán i ostatními organizacemi, jelikož různorodost využívaných TED a jejich způsobů vyhodnocení komplikuje vzájemné porovnávání a interpretaci naměřených dat [25].

Informace byly brány z [2].

4.4 Výsledky

Zde jsou uvedeny výsledky publikované v [2]. Jedná se o data naměřená TL a OSL detektory z obou sad DOSIS a z prvních šesti sad DOSIS3D, tedy o data naměřená mezi lety 2009 a 2015. Pro větší názornost jsou zde uvedeny i obrázky z [11], které byly získány z dat naměřených aktivními detektory.

Na naměřená data lze pohlížet z několika hledisek. Nejprve je uvedeno srovnání dat získaných z několika TL a ze všech OSL detektorů v rámci jedné sady experimentu DOSIS3D, konkrétně druhé. Poté následuje srovnání dat, které byly získány TL detektory $^6\text{LiF:Mg,Ti}$ a $^7\text{LiF:Mg,Ti}$ v rámci všech osmi vyhodnocených sad. Dále je zmíněno stručné porovnání dat z pasivních a aktivních detektorů; nakonec je uvedeno krátké srovnání s daty naměřenými mimo modul Columbus.

Srovnáním dat od TL detektorů z DOSIS3D s daty získanými v ISS mimo modul

Columbus od detektorů stejného materiálu plyne, že velmi závisí na lokálním stínění. Data se v závislosti na jeho tloušťce mohou lišit až dvojnásobně.

Tato práce je zaměřena především na detektory stop v pevné fází, a proto jsou následující informace zestručněny.

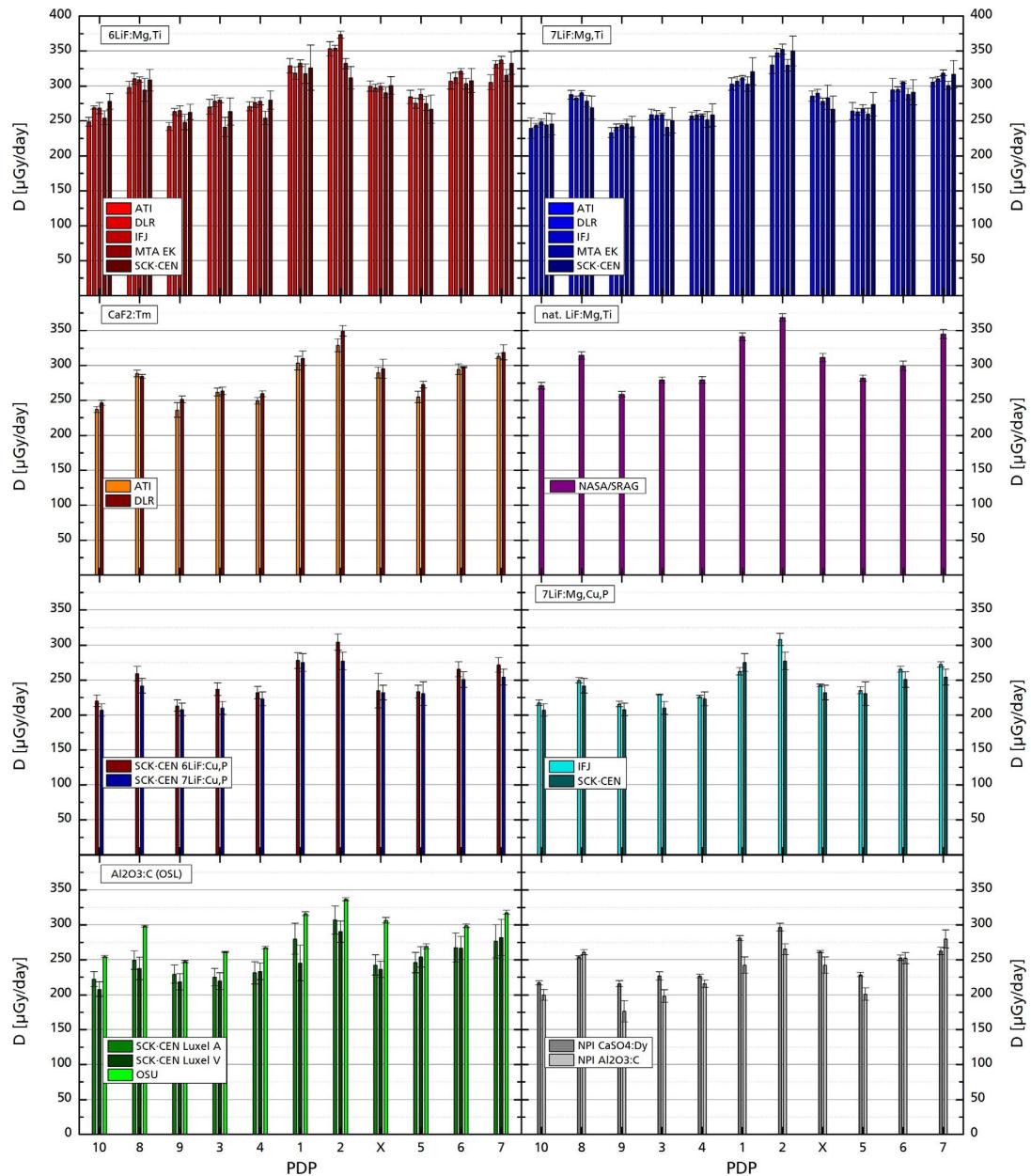
4.4.1 Srovnání dat pasivních detektorů v rámci jedné sady

V obr. 4.4 jsou uvedeny dávkové příkony naměřené detektory z 2. sady DOSIS3D v závislosti na pozici detektoru, tzn. na PDP. Jedná se o TL detektory z materiálů: $^6\text{LiF:Mg,Ti}$; $^7\text{LiF:Mg,Ti}$; $\text{CaF}_2:\text{Tm}$; $^{^{\text{N}}\text{at}}\text{LiF:Mg,Ti}$; $^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$; $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$; $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a o všechny OSL detektory. Je vidět, že data ze všech detektorů sledují v podstatě stejný trend a že dávkové příkony z detektorů stejného materiálu vycházejí přibližně stejně. Avšak na druhou stranu jsou zde patrné rozdíly mezi naměřenými dávkovými příkony detektorů různých materiálů. Jedním z důvodů je rozdílná účinnost detekce těžkých nabitého částic každého TL/OSL materiálu (viz oddíl 2.1); to je např. případ materiálů $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ používaných NPI.

Tabulka 4.6: Poměry odezv TLD materiálů s odezvou referenčního $^7\text{LiF:Mg,Ti}$. Odezvou se myslí určená dávka z daného detektoru [2].

Materiál	Poměr odezv
$^6\text{LiF:Mg,Ti}$	1,06
$^{^{\text{N}}\text{at}}\text{LiF:Mg,Ti}$	1,06
$^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$	0,90
$^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$	0,87
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ (OSLD)	1,04
$\text{CaF}_2:\text{Tm}$	1,01
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	0,88
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ (TLD)	0,82

Dávkový příkon od $^6\text{LiF:Mg,Ti}$, respektive $^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$ je systematicky vyšší než od $^7\text{LiF:Mg,Ti}$, resp. $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$, což je způsobeno tím, že nuklid ^6Li má velký účinný průřez pro reakci (n, α) s tepelnými neutrony. Nicméně rozdíl mezi těmito dvěma materiály není absorbovaná dávka pocházející od neutronů, ale od záření γ . Tato dávka je takové velikosti, aby vyvolala stejný termoluminiscenční signál jako skutečně obdržená dávka od neutronů. Tento jev je nazýván gamma ekvivalent neutronové dávky



Obr. 4.4: Naměřené dávkové příkony detektory různých materiálů. Na ose x jsou čísla PDP, jejichž pořadí je založeno na poloze PDP v modulu Columbus (viz 4.1) [2].

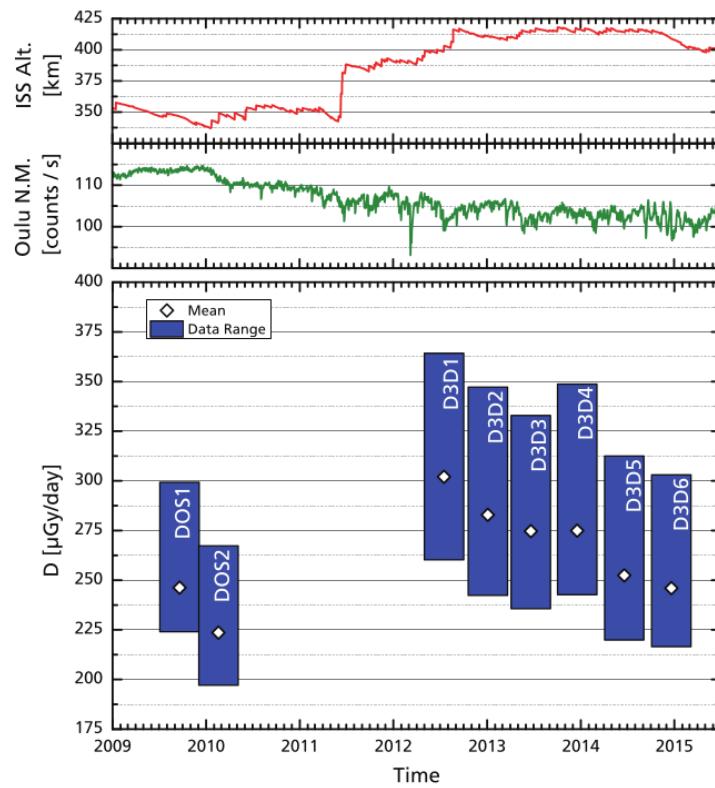
(“gamma-equivalent neutron dose”), [2].

V tab. 4.6 jsou poměry dávek určených výše zmíněnými detektory s dávkou určenou z TL materiálu ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$. Je vidět, že detektory od NPI mají nejmenší účinnost.

Výsledky z OSLD jsou celkem ve shodě vzhledem k rozmanitosti využitelných metod.

4.4.2 Srovnání dat z osmi sad pro jeden pasivní detektor

Obr. 4.5 zobrazuje zprůměrovaný rozsah dávkových příkonů, které byly určeny z dat ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ od několika organizací; například pro D3D2 (druhá sada DOSIS3D) je interval naměřených dávkových příkonů přibližně [250, 350] $\mu\text{Gy}/\text{den}$ (lze srovnat s obr. 4.4). Na ose x je čas v letech. Obrázek dále obsahuje v horní části nadmořskou výšku ISS a četnost neutronů naměřených Oulu monitorem (viz oddíl 4.2.1). Pokles dávkového příkonu z DOS1 na DOS2 (sady 1 a 2 experimentu DOSIS) byl způsoben vzrůstající sluneční aktivitou; prudký vzrůst z DOS2 na D3D1 je spojen s nárazovitým zvýšením nadmořské výšky ISS; poté se už nadmořská výška moc neměnila a pomalý pokles je tedy dán hlavně vzrůstající sluneční aktivitou. Je zajímavé, že při D3D6 detektory obdržely jen o trochu vyšší dávky než při DOS1.



Obr. 4.5: Rozsahy dávkových příkonů naměřených TLD materiálem ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ v rámci prvních osmi sad experimentů DOSIS a DOSIS3D. V horní části obrázku jsou parametry ovlivňující velikost obdržené dávky, tj. nadmořská výška ISS a četnost neutronů naměřená Oulu monitorem [26], která souvisí se sluneční aktivitou.

Absorbovaná dávka z detektorů, které byly umístěny u čelní stěny vzhledem k pohybu ISS (jedná se o PDP 3, 4, 8, 9, 10), je menší než absorbovaná dávka z detektorů umístěných u zadní stěny (PDP 1, 2, 5, 6, 7, X). To je možné vysvětlit anizotropií

zachycených protonů v SAA (viz oddíl 1.2.4).

4.4.3 Srovnání dat pasivních a aktivních detektorů

V tab. 4.7 jsou srovnány absorbované dávky určené pomocí ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ a pomocí aktivního detektoru DOSTEL-1. Data od ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ pocházejí z PDP X (viz obr. 4.1), který je upevněn na boxu, v němž se nachází aktivní detektory (viz obr. 4.3). Absorbované dávky aktivního detektoru byly určeny zprůměrováním dat přes časový interval odpovídající dané sadě (viz tab. 4.3). Hodnoty v tab. 4.7 představují přeypočtené absorbované dávky ve vodě. Je vidět, že data z obou typů detektorů jsou ve shodě.

Při porovnávání dat z TLD a DOSTEL je třeba brát v úvahu několik věcí. Zaprvé účinnost detekce částic nad cca 10 keV/ μm u TLD klesá, zatímco u DOSTEL je v podstatě stále stoprocentní. Dále pasivní detektory byly v PDP umístěny okolo 95 % svého měřícího cyklu, zbytek času strávily cestováním na, resp. z ISS; nicméně toto pravděpodobně nezaneslo do měření nějakou větší chybu, protože při průletu atmosférou detektory obdrží zanedbatelnou dávku.

Tabulka 4.7: Porovnání absorbovaných dávek určených pomocí aktivního detektoru DOSTEL-1 a pomocí TLD (materiál ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$), které byly umístěny v PDP X, v rámci dosud vyhodnocených sad [2].

	Sada	Nadmořská výška ISS [km]	Absorbovaná dávka [$\mu\text{Gy/den}$]	
			DOSTEL-1	${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$
DOSIS	1	339-348	248 ± 20	261 ± 21
	2	337-349	234 ± 18	238 ± 10
DOSIS3D	1	397-417	286 ± 25	311 ± 9
	2	407-416	288 ± 20	281 ± 9
	3	407-416	297 ± 23	294 ± 7
	4	413-418	294 ± 23	294 ± 12
	5	413-417	279 ± 22	262 ± 7
	6	401-416	256 ± 20	256 ± 7

Výhodou aktivních detektorů je, že dokážou rozseznat příspěvky k dávce od GCR a od zachycených protonů v SAA.

5. Vyhodnocení tří detektorů stop v pevné fázi

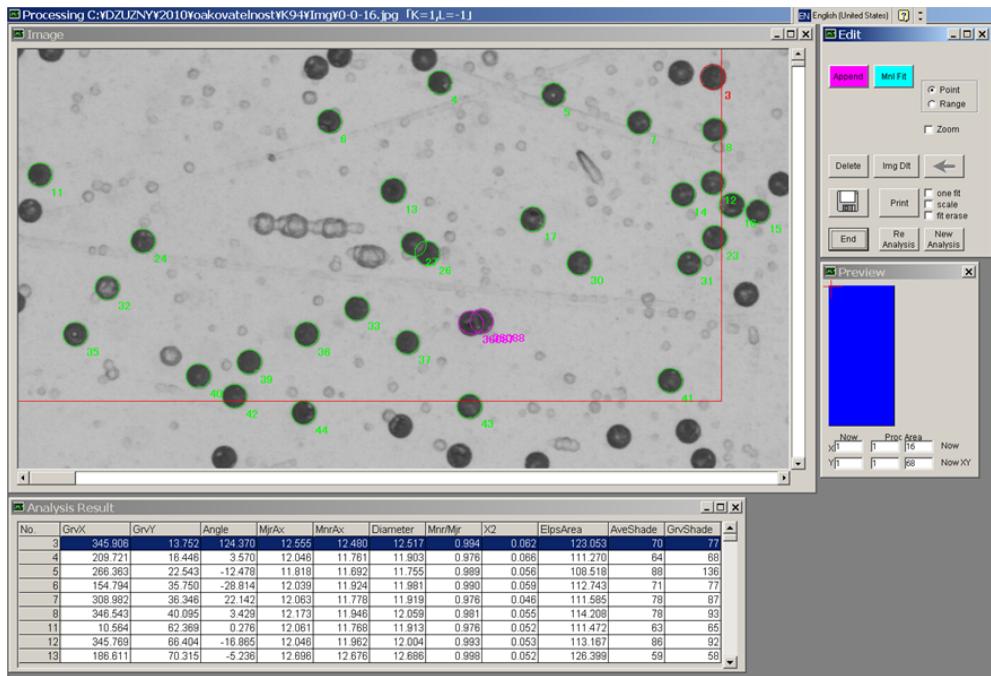
V praktické části bakalářské práce byly vyhodnoceny tři detektory stop osmé sady experimentu DOSIS3D, které byly součástí prvního, druhého a třetího PDP. Jedná se o detektory z materiálu Tastrak, které byly leptány 6 hodin, tj. zobrazené stopy jsou původem od částic s krátkým dosahem a vyšším LET. Povrch detektorů byl již nasnímán, vyhodnocení detektorů tedy započalo analýzou stop v programu HspFit. Tento program sám vyhodnotí a zaznamená při dobrém nastavení určitých parametrů většinu stop, zbytek se musí označit ručně, což je zdlouhavá práce. Stopy se zaznamenávají tak, že se jejich okraj fituje elipsou, přičemž parametry fitu představují osy elipsy (hlavní a a vedlejší b). V případě špatného automatického fitu lze proklad opravit ručně. Na obr. 5.2 vidíme okno programu HspFit, zeleně jsou označeny stopy zaznamenané počítacem, červeně stopy zaznamenané uživatelem a fialově opravené fity. Dále lze pozorovat, že některé stopy ještě na zaznamenání čekají.

Na obr. 5.1 je mikroskopický systém HSP-1000 (neúplný, chybí počítač, který systém řídí) pomocí něhož byl povrch detektorů nasnímkován v dostatečném přiblžení.

V obr. 5.3 jsou uvedeny jednotlivé snímky z povrchu náhodně vybraného detektoru. V (a) je snímek, který obsahuje v čisté stopy; v (b) ukazuje červená šipka poškození materiálu, které by mohl neznalý uživatel vyhodnotit jako vícero stop; v (c) takéž



Obr. 5.1: Vysoko rychlostní optický mikroskop HSP-1000. [27]



Obr. 5.2: Okno programu HspFit; zeleně jsou označeny fity vygenerované počítačem, fialově opravené fity uživatelem a červeně fity vytvořené uživatelem. [27]

ukazuje červená šipka poškození materiálu, ale jiného charakteru. Obr. 5.4 pak ukazuje snímky, na nichž je naskenována plocha, která byla fyzicky znehodnocena člověkem (označení detektoru vyrtým X).

Osy všech elips byly spolu s dalšími parametry fitů (např. sklon elipsy) uloženy v souboru s příponou .nap. Tyto data byla zpracována skriptem napsaném v programovacím jazyce Python, jehož výstupem jsou dva soubory a jeden graf. První soubor obsahuje údaje o poloze stopy, os fitované elipsy, poměru leptacích rychlostí V , korekčním součiniteli k_θ , lineárním přenosu energie LET , dávce D_i a dávkovém ekvivalentu H_i každé stopy. Druhý soubor obsahuje celkovou dávku a dávkový ekvivalent, které se absorbovaly v detektoru; dále obsahuje data potřebná k vytvoření diferenciálního LET spektra; z těchto dat je vytvořen výstupní graf. Skript vypočítává pro každou částici V z hodnot a, b (vztah (2.3), tloušťka odleptané vrstvy je $7,5 \mu\text{m}$) a následně LET dané částice z V pomocí kalibrační křivky pro TASTRAK leptaný 6 hodin. Tato i druhá kalibrační křivka pro TASTRAK leptaný 15 hodin jsou tvaru

$$LET(V) = -99,8424 + 125,00172V - 15,28166V^2 + 2,04636V^3 \quad (6 \text{ hod}), \quad (5.1)$$

$$LET(V) = -96,35071 + 114,90343V - 7,77194V^2 + 1,27248V^3 \quad (15 \text{ hod}), \quad (5.2)$$

kde LET vychází v $\text{keV}/\mu\text{m}$; závislosti byly přebrány z [10]. Z LET částice je dále

vypočítána dávka předaná danou částicí D_i ze zjednodušeného vztahu (2.5)

$$D_i = \text{konst} \cdot LET \cdot k_\theta \cdot \frac{2}{\text{ProcArea}}, \quad (5.3)$$

kde $\text{konst} = 1,602 \cdot 10^{-6}$, $\text{ProcArea} <++?++>$. Dávkový ekvivalent od dané částice H_i je určen ze vztahu

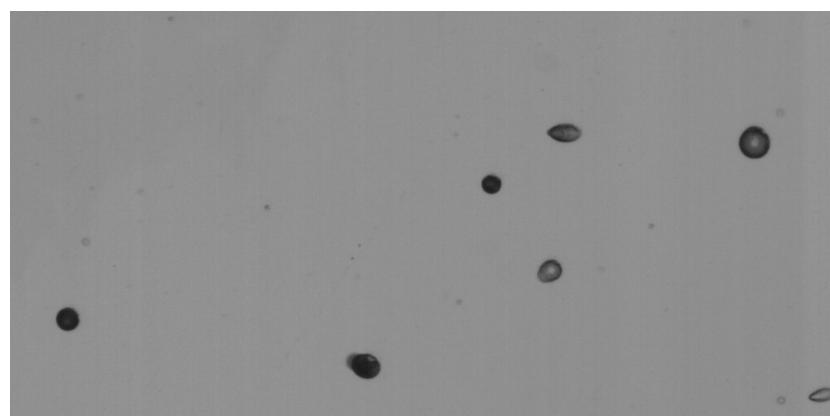
$$H_i = D_i \cdot Q. \quad (5.4)$$

Q je jakostní faktor určený podle ICRP 60 (tab. 2.3). Celková dávka D a dávkový ekvivalent H jsou D_i a H_i všech částic.

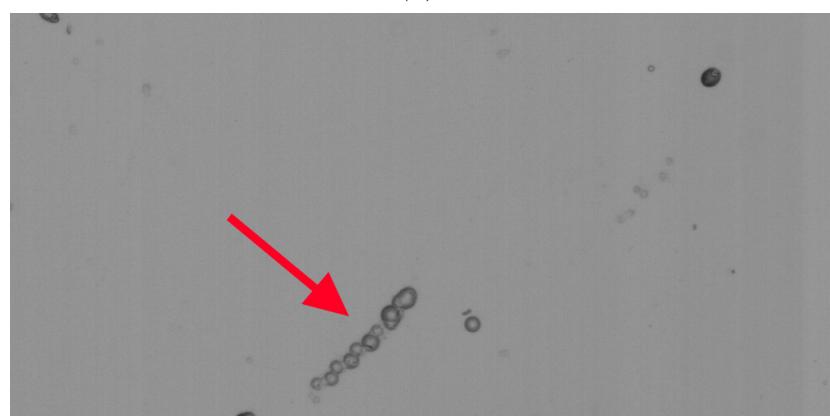
V tab. 5.1 jsou celkové dávky a dávkové ekvivalenty určené třemi vyhodnocenými detektory Na obr. 5.5 jsou LET spektra získaná z vyhodnocených detektorů.

Tabulka 5.1: Celkové dávky D a dávkové ekvivalenty H určené vyhodnocovanými detektory.

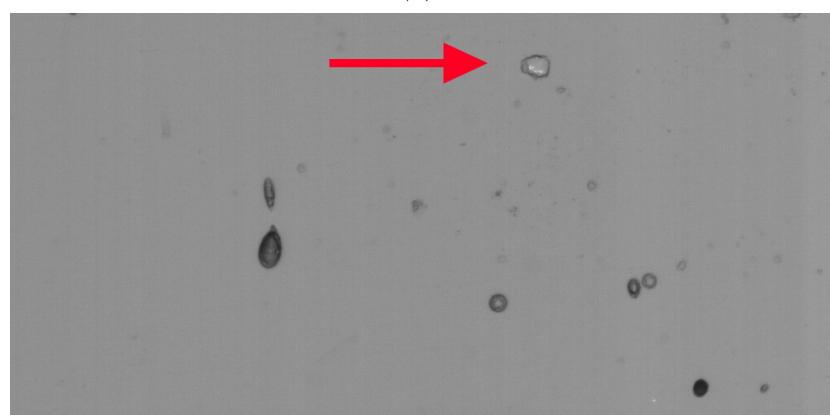
PDP	D [mGy]	H [mSv]
1	5,3150	88,2754
2	5,0686	92,5693
3	4,3113	75,4191



(a)

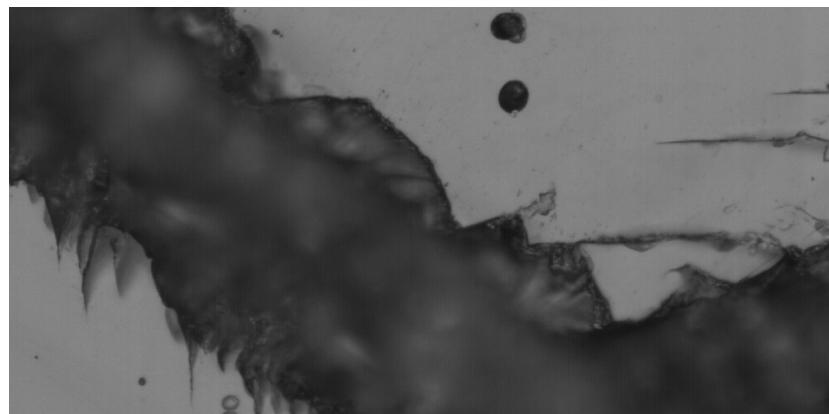


(b)

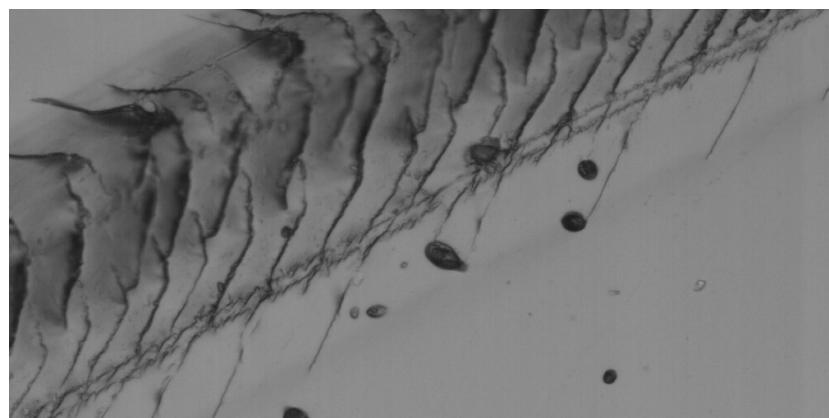


(c)

Obr. 5.3: Příklad naskenovaných snímků jednoho detektoru. V (a) jsou vidět normální stopy, v (b) a (c) naopak červené šipky ukazují na poškození materiálu, která nevznikla působením ionizujícího záření.

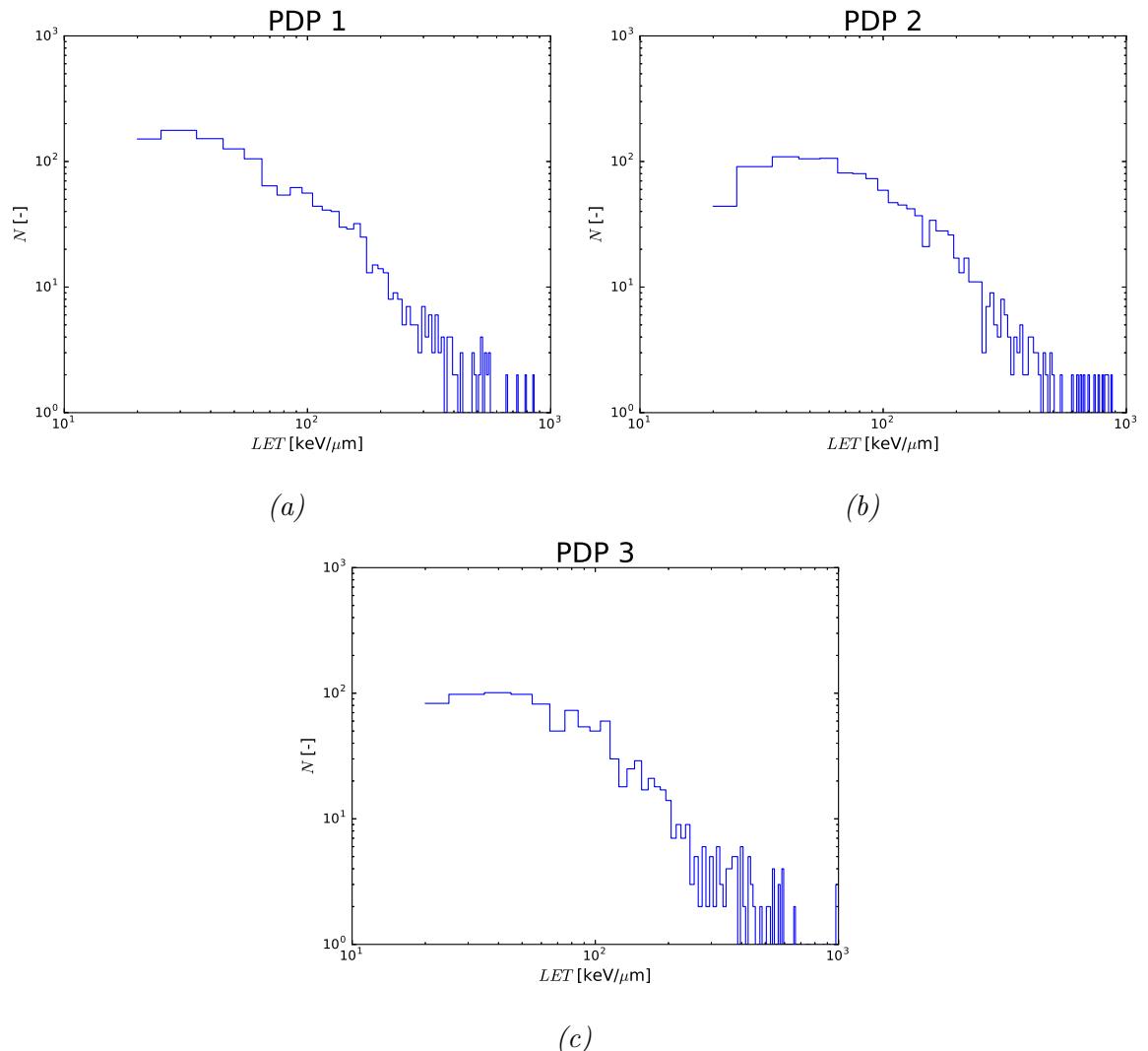


(a)



(b)

Obr. 5.4: Naskenované snímky zobrazující poškozené části plochy detektoru vyrytím značky X.



Obr. 5.5: Diferenciální LET spektra vyhodnocených detektorů. Na svislé ose je počet impulzů spadnulích do příslušného kanálu.

Závěr

skldfja

Seznam literatury

1. BENTON, E.R; BENTON, E.V.

Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2001, roč. 184, č. 1–2, s. 255–294.

ISSN 0168-583X. Dostupné také z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X01007480>.

Advanced Topics in Solid State Dosimetry.

2. BERGER, T. et al. DOSIS & DOSIS 3D: long-term dose monitoring onboard the Columbus Laboratory of the International Space Station (ISS).

J. Space Weather Space Clim. 2016, roč. 6, s. 39.

Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2016034>.

3. AMBROŽOVÁ, I.; BRABCOVÁ, K.; SPURNÝ, F.; SHURSHAKOV, V. A.;

KARTSEV, I. S.; TOLOCHEK, R. V.

Monitoring on board spacecraft by means of passive detectors.

Radiation Protection Dosimetry. 2011, roč. 144, č. 1-4, s. 605–610. ISSN 0144-8420.

4. SPURNÝ, F.; JADRNIČKOVÁ, I. Dependence of thermoluminescent detectors relative response on the linear energy transfer; some examples of use.

Radiation Measurements. 2008, roč. 43, č. 2–6, s. 944–947. ISSN 1350-4487.

Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.11.041>.

Proceedings of the 15th Solid State Dosimetry (SSD15).

5. YOUNG, D. A. Etching of Radiation Damage in Lithium Fluoride. *Nature.*

1958, roč. 182, s. 375–377. Dostupné z DOI: <10.1038/182375a0>.

6. FLEISCHER, R. L.; PRICE, P. B.; WALKER, R. M.

Ion Explosion Spike Mechanism for Formation of Charged Particle Tracks in Solids.

- Journal of Applied Physics.* 1965, roč. 36, č. 11, s. 3645–3652.
Dostupné z DOI: [10.1063/1.1703059](https://doi.org/10.1063/1.1703059).
7. YAMAUCHI, Tomoya. Studies on the nuclear tracks in CR-39 plastics.
Radiation Measurements. 2003, roč. 36(1-6), s. 73–81.
Dostupné z DOI: [10.1016/S1350-4487\(03\)00099-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(03)00099-4).
8. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *CR-39* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25].
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/CR-39>.
9. PACHNEROVÁ BRABCOVÁ, K. *Study and development of track etch detectors for dosimetric purposes: dissertation thesis.* 2010. Disertační práce.
České vysoké učení technické v Praze, FJFI, Katedra jaderné chemie.
10. PÁLFALVI, J.K. Fluence and dose of mixed space radiation by SSNTDs achievements and constraints. *Radiation Measurements.* 2009, roč. 44, č. 9–10, s. 724–728.
ISSN 1350-4487.
Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.045>.
Proceedings of the 24th International Conferenceon Nuclear Tracks in Solids.
11. BERGER, THOMAS et al.
DOSIS & DOSIS 3D: radiation measurements with the DOSTEL instruments onboard the Columbus Laboratory of the ISS in the years 2009–2016.
J. Space Weather Space Clim. 2017, roč. 7, s. A8.
Dostupné z DOI: [10.1051/swsc/2017005](https://doi.org/10.1051/swsc/2017005).
12. REITZ, Guenther.
Characteristic of the radiation field in low earth orbit and in deep space.
Zeitschrift für Medizinische Physik. 2008, roč. 18, č. 4, s. 233–243. ISSN 0939-3889.
Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2008.06.015>.
13. NARICI, Livio; BERGER, Thomas; MATTHIÄ, Daniel; REITZ, Günther.
Radiation Measurements Performed with Active Detectors Relevant for Human Space Exploration. *Frontiers in Oncology.* 2015, roč. 5, s. 273. ISSN 2234-943X.
Dostupné z DOI: [10.3389/fonc.2015.00273](https://doi.org/10.3389/fonc.2015.00273).
14. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia.
Scale height used in a simple atmospheric pressure model [online].

- 2017 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Scale_height#Scale_height_used_in_a_simple_atmospheric_pressure_model.
15. GARCIA, Mark. *Station Facts and Figures* [online]. 2016 [cit. 2017-04-17].
Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures>.
16. FICK, Hayley; JORDAN, Gary; SUMNER, Megan.
16 Years of Station Told in 16 Gifs [online]. 2016 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z:
<https://www.nasa.gov/feature/16-years-of-station-told-in-16-gifs>.
17. WIKIPEDIA, Otevřená encyklopédie. *Mezinárodní vesmírná stanice* [online].
2017 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mezin%C3%A1rodn%C3%AD_vesm%C3%AD%C4%8Dn%C3%AD_stanice.
18. ESA. *Where is the International Space Station?* [online]. 2017 [cit. 2017-04-21].
Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/Where_is_the_International_Space_Station.
19. ESA. *About the International Space Station* [online]. 2013 [cit. 2017-04-21].
Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/About_the_International_Space_Station.
20. ESA. *How much does it cost?* [online]. 2013 [cit. 2017-04-22].
Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/How_much_does_it_cost.
21. MALIK, Tariq. *International Space Station Gets Life Extension Through 2024* [online].
2014 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.space.com/24208-international-space-station-extension-2024.html>.
22. ESA. *A view of the European Columbus laboratory attached to the International Space Station* [online]. 2008 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2008/02/A_view_of_the_European_Columbus_laboratory_attached_to_the_International_Space_Station.
23. ESA. *ESA astronaut Hans Schlegel works on Columbus exterior during the second spacewalk of the STS-122 mission* [online]. 2008 [cit. 2017-04-21].
Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2008/02/ESA_astronaut_Hans_Schlegel_works_on_Columbus_exterior_during_the_second_spacewalk_of_the_STS-122_mission2.

24. WRIGHT, Jerry. *Station Facts and Figures* [online]. 2015 [cit. 2017-04-22].
Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/columbus.html.
25. PACHNEROVÁ BRABCOVÁ, K.; AMBROŽOVÁ, I.; DAVÍDKOVÁ, M.; NAGASAKI, Y.; ČERVENKOVÁ, A.; BERGER, T. Spektra lineárního přenosu energie kosmického záření získaná detektory stop v pevné fázi metodou per partes. *Bezpečnost jadrovej energie*. 2017, roč. 25, č. 3/4, s. 110–113. ISSN 1210-7085.
26. USOSKIN, Ilya. *Cosmic Ray Station of the University of Oulu* [online]. [Cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://cosmicrays.oulu.fi>.
27. AVČR, ODZ ÚJF. *Mikroskop HSP-1000* [online]. [Cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://cesky.odz.ujf.cas.cz/home/vybaveni/mikroskop-hsp-1000>.