

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

Abstrakt: Kosmické záření představuje veliký zdravotní risk při pobytu ve vesmíru. K jeho monitorování se používají i pasivní detektory, obzvláště pak termoluminiscenční detektory a detektory stop v pevné fázi. Experiment DOSIS, který probíhal v rozmezí let 2009–2011, měl za úkol stanovit prostorovou distribuci dávky uvnitř modulu Columbus, který je součástí Mezinárodní kosmické stanice. Se stejným cílem byl v roce 2012 spuštěn experiment DOSIS3D, jenž probíhá doposud. Z naměřených dat lze také do určité míry vyvodit závislost dávkového příkonu na řadě parametrů, např. sluneční aktivitě a nadmořské výšce. Tato práce pojednává o složení kosmického záření v blízkém okolí Země, o výše zmíněných pasivních detektorech, o projektech DOSIS a DOSIS3D a nakonec je uvedena názorná ukázka vyhodnocení tří detektorů stop, které byly umístěny v modulu Columbus.

Klíčová slova: kosmické záření v blízkém okolí Země, detektory stop v pevné fázi, ISS, modul Columbus, DOSIS, DOSIS3D

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

Author: Michal Šesták

Abstract: Cosmic rays are representing a huge health risk. Passive detectors are widely used for their measurement, especially thermoluminescent detectors and solid state nuclear track detectors. Experiment DOSIS was running between years 2009–2011 and its purpose was the determination of radiation environment within the International Space Station's Columbus module. Experiment DOSIS3D, which has started in 2012, has the same aim. The measured data can also provide informations about influence of several parameters (for instance solar activity, altitude) to the dose rate. This thesis includes informations about characteristics of the cosmic rays in low Earth orbit, about passive detectors used in space measurements, about experiments DOSIS and DOSIS3D. There is also involved the evaluation of three track etched detectors at the end of the work.

Key words: cosmic rays in low Earth orbit, solid state nuclear track detectors, ISS, Columbus module, DOSIS, DOSIS3D

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	15
1.2.5 Stínění	15
2 Pasivní detektory používané k monitorování kosmického záření	17
2.1 Termoluminiscenční detektory	17
2.2 Detektory stop v pevné fázi	19
2.2.1 Vyhodnocování	21
2.3 Kombinace dat z TLD a TED	23
3 Mezinárodní kosmická stanice	24
3.1 Modul Columbus	25
4 Experimenty DOSIS a DOSIS 3D	27
4.1 Rozmístění pasivních detektorů	28
4.2 Průběh experimentů	28

4.2.1	Vývoj nadmořské výšky a slunečního cyklu	29
4.3	Používané detektory	30
4.3.1	Termoluminiscenční detektory	31
4.3.2	Opticky stimulované luminiscenční detektory	32
4.3.3	Detektory stop v pevné fázi	33
4.3.4	Aktivní detektory DOSTEL	33
4.4	Výsledky	34
4.4.1	Srovnání dat pasivních detektorů v rámci jedné sady	35
4.4.2	Srovnání dat z osmi sad pro jeden druh pasivního detektoru	36
4.4.3	Srovnání dat pasivních a aktivních detektorů	38
4.4.4	Srovnání s jinými experimenty	39
5	Vyhodnocení detektorů stop v pevné fázi (praktická část)	42
5.1	Metodika	42
5.2	Vyhodnocení	43
5.3	Diskuze	51
Závěr		52

Úvod

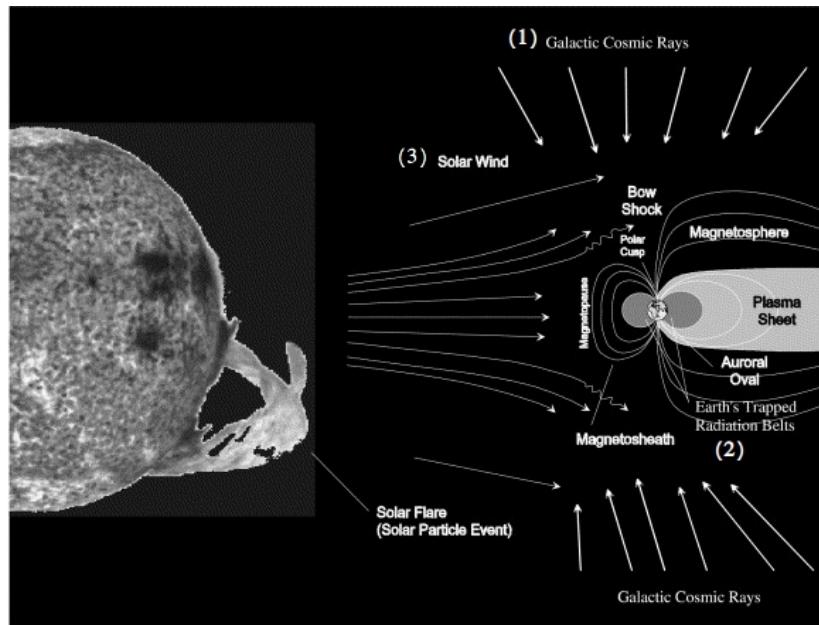
alskdjfjlkasjdflakdsf asdfkldf

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 erupcí (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 vysokým atomovým číslem a velkou energií, jelikož jsou relativně hojné a mají velikou pronikavost.

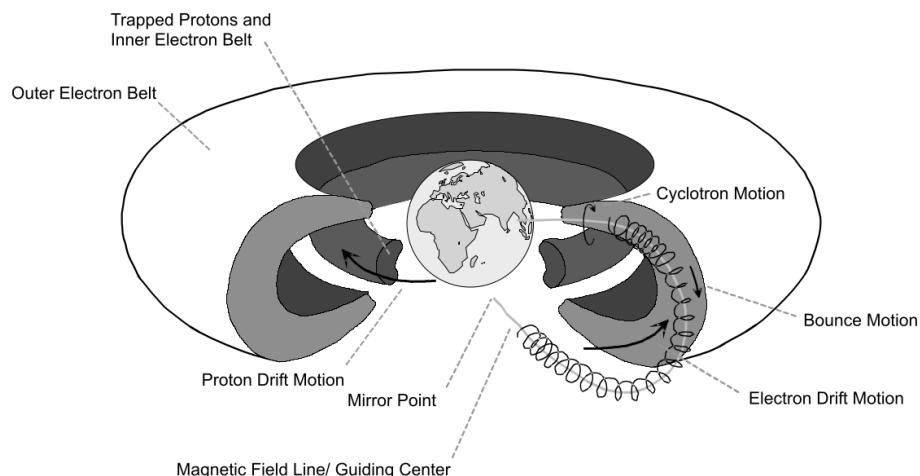
Tok kosmického záření, které vstupuje do sluneční soustavy a zároveň nemá energii větší než cca 1 GeV, je zeslabováno slunečním větrem. Intenzita tohoto zeslabení se odvíjí od jedenáctiletého slunečního cyklu: k největšímu zeslabení dochází při slunečním maximu, naopak při slunečním minimu je zeslabení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

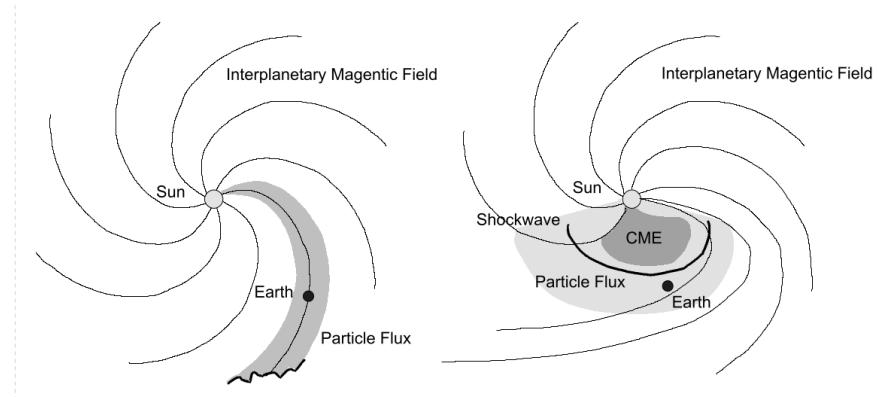
Zachycené elektrony se nacházejí ve dvou vrstvách a vzhledem k jejich převážně nízké energii nepředstavují veliký zdravotní riziko. Zachycené protony se nacházejí v jedné oblasti a jejich intenzita klesá s rostoucí vzdáleností od Země. Jejich energie se pohybuje v řádech od jednotek do stovek MeVů, přičemž maximum dosahuje hodnoty 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 [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.

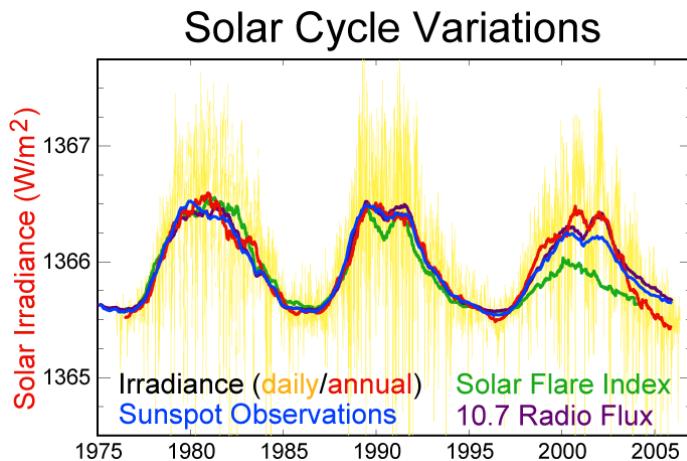
Důležité jsou dva typy jaderných interakcí: fragmentace terčového jádra a fragmentace projektilu. Při první z nich dochází k rozštěpení terčíku; tato interakce nastává při srážce vysokoenergetické primární nabité částice, obvykle GCR nebo zachyceného protonu, a těžkého jádra, obvykle Al jádra stanice 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; může také 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

Sluneční cyklus je opakující se vývoj sluneční aktivity s periodou jedenácti let. Na obr. 1.4 je vidět vývoj sluneční aktivity z období let 1975 až 2005; maxima a minima jsou snadno rozpoznatelná.

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].



Obr. 1.4: Příkon fluenze energie pocházející od částic emitovaných ze Slunce v závislosti na čase. Červená křivka zobrazuje roční hodnoty, žlutá denní. Ostatní křivky pro nás nejsou podstatné [3].

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 sklonы 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 jihoatlantické anomálie je malý ve srovnání s orbitální periodou. Naopak pro malé sklonы oběžné dráhy (blízko rovníku) je největším zdrojem záření jihoatlantická anomálie, k čemuž přispívá i geomagnetické pole, jež většinu GCR částic odnáší pryč od rovníku.

1.2.3 Nadmořská výška

Ozáření vesmírného objektu v blízkém okolí Země je silně závislé na nadmořské výšce: dávkový příkon roste s nadmořskou výškou. Tato závislost je způsobena hlavně protony zachycenými v ERBs, a proto platí omezeně (do vzdálenosti dané rozsahem radiačních pásů). Pokud se objekt nachází nad SAA, pak je růst exponenciální (do určitých výšek).

Znatelný je také vliv hustoty atmosféry, která s rostoucí nadmořskou výškou klesá a která je navíc ovlivněna slunečním cyklem. Čím je atmosféra hustší, tím je záření více utlumeno (interakcemi s prvky atmosféry) [1]. Ozáření pocházející od GCR je na nadmořské výšce v podstatě nezávislé, pokud uvažujeme ozáření objektu nacházejícího

se nad atmosférou [2].

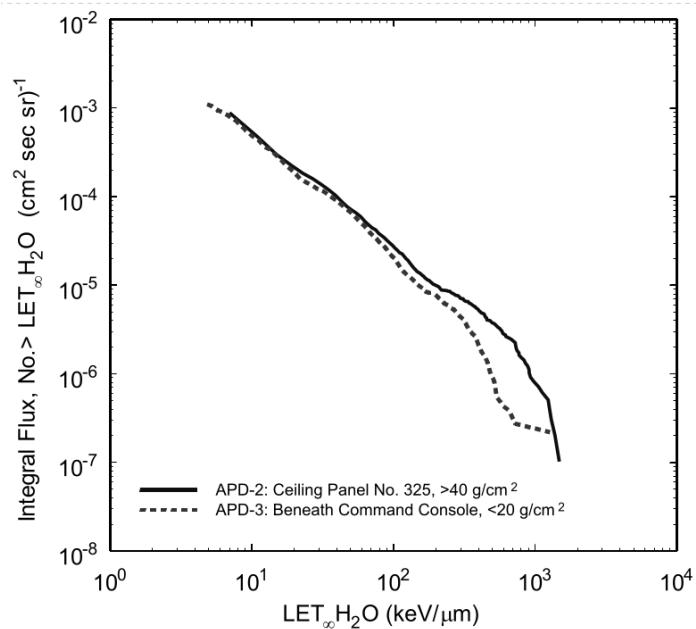
1.2.4 Východní/západní anizotropie zachycených protonů

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 vznik v nadmořské výšce, pro který se atmosférický tlak sníží o faktor e [4]. 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 může zvýšit jakostní činitel záření Q , tedy potenciální nebezpečnost záření z hlediska zdraví astronautů. Vznik Q je dán zpomalením primárních částic ve stínění, které vede ke zvýšení jejich LET (Linear energy transfer, lineární přenos energie) [5].

Tento jev lze pozorovat např. v měřeních prováděných univerzitou v San Franciscu v letech 1996-1997 na palubě ruské kosmické stanice Mir. Obr. 1.5 zobrazuje dvě integrální 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 $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$ jsou obě 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. 1.5: Integrální LET spektra měřená na dvou různě odstíněných místech v kosmické stanici Mir v roce 1997 [1]. Plná čára zobrazuje spektrum silně stíněného detektoru, čárkovana 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 risk [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 zpravidla dopraveny na Zem do příslušné laboratoře [1].

K monitorování kosmického záření se používají detektory založené na 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 navíc 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], avšak nezjistí se kvalita záření (většinou).

2.1 Termoluminiscenční detektory

Termoluminiscence je jev vyskytující se u některých pevných látek. Jeho podstata spočívá v tom, že je-li látka ozářena, pak při zahřívání vyzařuje světlo, jehož množství je přímo úměrné energii, která byla při ozáření v látce deponována. Zjednodušeně lze jev vysvětlit následovně: ionizující záření při interakci s látkou mimo jiné vytrhává elektrony z valenčního pásu, čímž vznikají iontové páry (záporný elektron a kladná díra) a vytržené elektrony přecházejí do vodivostního pásu; část vytržených elektronů anihiluje s děrami (což uvolňuje tepelnou energii), avšak některé z nich se zachytí na tzv. elektronových pastech (nehomogeneity v látce atp.); aby se elektron z pasti dostal, tak mu musí být dodána energie k překonání vazby, což se děje při zahřívání

látky; uvolněný elektron následně anihiluje s dírou, přičemž energie je vyzářena ve formě elektromagnetického záření (přibližně ve viditelném spektru) nebo je předána tzv. luminiscenčnímu centru, které energii také přemění na světlo. Luminiscenční centra jsou tvořena stopovými příměsemi prvků (např. Mn, Dy, Tm, Cu, C, ...). Světelný signál je zesílen fotonásobičem a poté vyhodnocen.

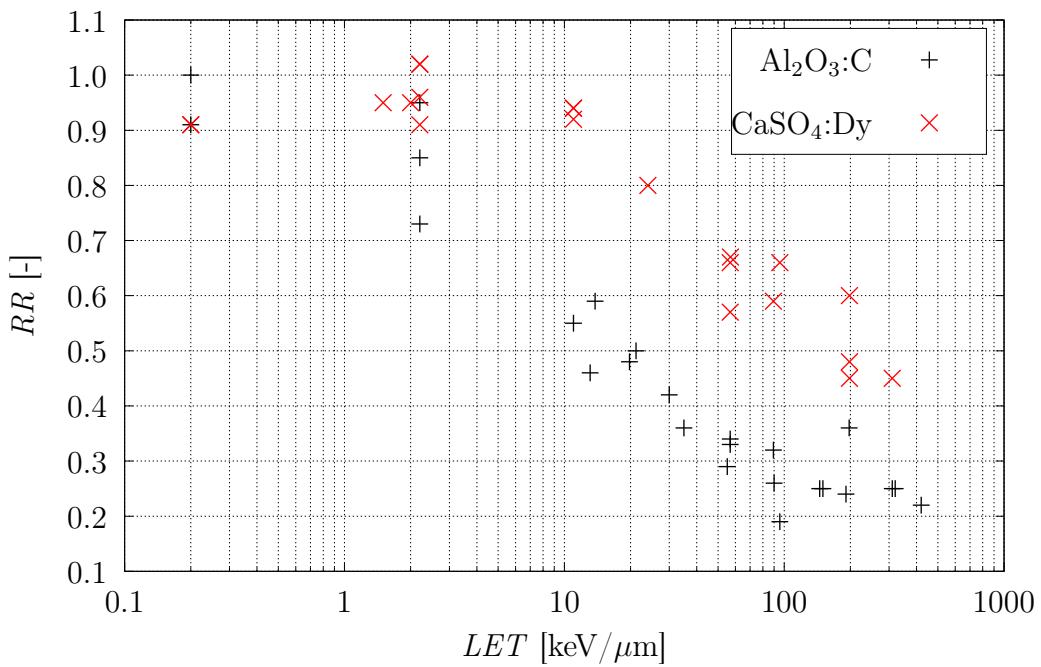
Pro vyhodnocení TL signálu je důležitým pojmem vyhřívací křivka TLD, což je závislost světelného toku (respektive elektrického signálu z fotonásobiče) na teplotě. Odezva TLD se určí právě z této křivky (např. jako plocha pod křivkou, plocha pod píkem, výška píku [2]) a na základě kalibrace ve známém zdroji lze určit absorbovanou dávku.

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 [6]. 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 [7].

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 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$. Tyto detektory byly, resp. jsou používány v experimentech DOSIS a DOSIS3D. V obr. 2.1 jsou hodnoty relativní odezvy (relativní vůči ${}^{60}\text{Co}$) těchto detektorů pro částice s různým LET získané při experimentálním ozařování [8]. 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 zpřesnění měření v polích částic s různým LET je potřeba provést korekci TL odezev, jinak dochází k podhodnocení dávky; více informací v [7].



Obr. 2.1: Relativní odezva dvou detektorů používaných NPI pro částice s různým LET. Data pocházejí z [8].

2.2 Detektory stop v pevné fázi

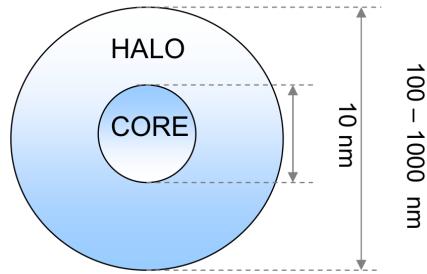
V některých pevných látkách vznikají při ozáření stabilní mikropoškození, tzv. latentní stopy, které mohou být vhodným způsobem zvětšeny. Následně lze zvětšené stopy spočítat např. pomocí mikroskopu, přičemž počet stop je úměrný počtu částic, které s materiálem interagovaly. Používají-li se tyto látky 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, nedávno byla tato vlastnost objevena i u některých kovů, intermetalických sloučenin a supravodivých oxidů; tento jev byl poprvé pozorován v roce 1958 u krystalů LiF [9]. Jako TED se používají hlavně plasty, skla a minerální krystaly.

TED jsou schopné měřit pouze částice s *LET* vyšším než je určitá prahová hodnota, která je různá pro odlišné materiály, ale pohybuje se kolem 10 keV/μm [10]. Rozsah měřitelných *LET* je omezený i shora, tato hodnota také závisí na materiálu.

Latentní stopy 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* ($> 300 \text{ keV}/\mu\text{m}$), které by při jednostupňovém dlouhém leptání byly odstraněny, a po druhé fázi naopak lze identifikovat stopy vytvořené částicemi s malým *LET* (až do detekčního prahu), čímž se významně zvýší rozsah detekovatelných částic [11].

Tvorba latentních stop není doposud plně pochopena. U anorganických materiálů se jej snaží vysvětlit např. mechanismus popsáný v [12]. U organických materiálů je proces tvorby stop rozdělen do tří fází: fáze fyzikální, fáze fyzikální-chemická a fáze chemická. Při první fázi ztrácí částice v materiálu energii (excitacemi a ionizacemi elektronů z obalu terčíků, vyražením terčíku z polymerové vazby, brzdným záření 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 vnější oblasti o průměru odpovídající dosahu delta elektronů, viz obr. 2.2. Poslední fáze představuje leptání, při němž jsou stopy zafixovány a zvětšeny. [13]



Obr. 2.2: Latentní stopa v organickém materiálu se skládá z jádra (CORE) a z obalu (HALO). [13]

Řada vnějších parametrů hraje roli při tvorbě stop v plastech. Například absence kyslíku v okolním prostředí a vyšší teploty způsobují, že vznikající stopy jsou menší a detektor má sníženou citlivost [10].

Nejpoužívanějším TED materiélem je poly allyl diglykolkarbonát, který bývá často také nazýván CR-39 (zkratka původního výrobního jména Columbia Resin #39 [14]). Jako detektor stop v pevné fázi se začal používat ke konci 70. let 20. století [13]; ve vesmírné dozimetrii byl poprvé použit při prvním letu amerických raketoplánů Space Shuttle v roce 1981 [1]. Původní CR-39 byl schopen detekovat částice s *LET* vyšším než cca 5 $\text{keV}/\mu\text{m}$ [1]. V současné době je vyráběn pod různými jmény a s různými úpravami; také do něho bývají přidávány další přísady, které mají zlepšit jeho vlastnosti. Některé úpravy ovlivňují i účinnost detekce částic s menším *LET*, což jinými slovy

znamená zvýšení detekčního prahu. [13]

2.2.1 Vyhodnocování

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

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

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 [15]. 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; stopy jsou znázorněny jako tmavé elipsoidní objekty, viz obr. 2.3. Snímky mohou být dále zpracovány v příslušném programu; osy všech elips/stop (hlavní osa a , vedlejší osa b) jsou výstupem programu. Poměr leptacích rychlostí může být určen z hodnot a, b pro každou stopu ze vztahu

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

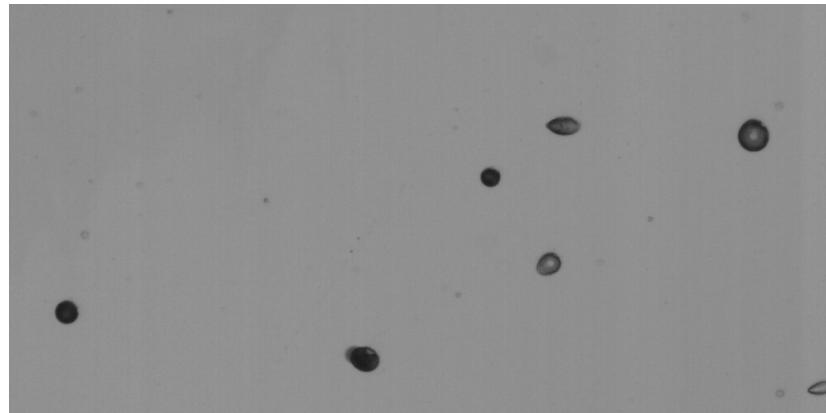
kde

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

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

a t je doba, po kterou se leptalo, tj. $d = V_M t$ je tloušťka odleptané vrstvy nepoškozeného materiálu; vztahy byly převzaty z [15]. Existuje více metod zjištění d . Je možné přímo měřit hodnoty tloušťek materiálu před a po leptání a poté je odečíst. Mnohem přesnější je např. metoda štěpných fragmentů; tato a další metody jsou popsány v [13].

Kalibrační křivka, neboli vztah mezi V a *LET*, je určena experimentálním ozařováním příslušného TED. Pro proklad naměřených dat lze použít nejrůznější funkce, příkladem je polynom třetího stupně, který má výhodu jednoduchosti. Je důležité poznamenat,



Obr. 2.3: Část plochy detektoru zaznamenaná mikroskopem, stopy jsou tmavé elipsoidní objekty.

že od určitých hodnot LET nejsou k dispozici kalibrační body, a proto nelze používat kalibrační křivku od těchto hodnot.

Existuje minimální úhel dopadu částice na detektor, při němž je stopa stále ještě po leptání zřetelná, tj. není leptáním odstraněna. Tento úhel se nazývá kritický úhel a je definován vztahem $\theta_k = 1/V$. Počet detekovaných částic na plochu N je třeba opravit na částice, které dopadly pod menším úhlem než θ_k ; za předpokladu izotropního rozložení dopadajících částic (což lze ve vesmíru brát jako splněné) to je možné provést 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. 2.1 a $\text{konst} = 1,602 \cdot 10^{-6}$ je převodní konstanta.

Vztah byl převzat z [13].

Tabulka 2.1: Hodnoty jakostního faktoru Q v závislosti na LET (ICRP 60, 1991).

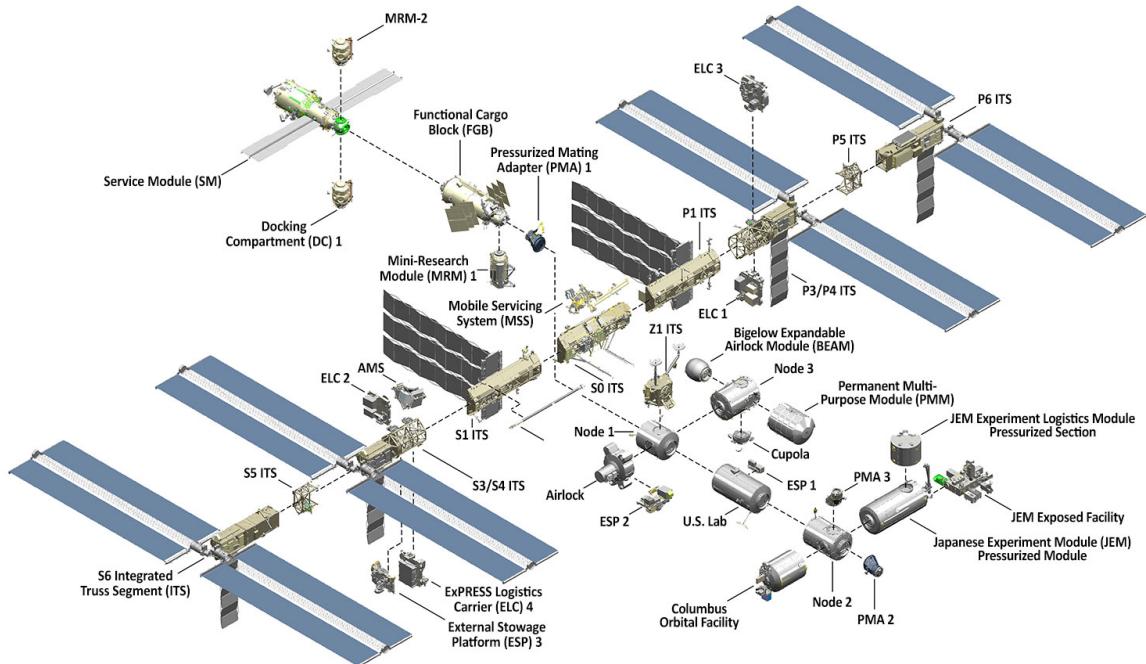
<i>LET [keV/μm]</i>	<i>$Q(\text{LET})$</i>
<10	1
[10; 100]	0,32 $\text{LET} - 2,2$
>100	$300/\sqrt{\text{LET}}$

2.3 Kombinace dat z TLD a TED

Citlivosti TLD a TED se celkem dobře doplňují, a tak lze tyto dva druhy pasivních detektorů využít ke změření celkové absorbované dávky a celkového dávkového ekvivalentu. Ze známosti relativní odezvy TL detektoru a z *LET* spektra získaným z dat změřených detektorem stop lze odečíst příspěvek částic s vysokým *LET* (tedy takových, pro které je $RR < 1$) od dávky změřené TLD. Zbylá dávka z TLD pocházející od částic s malým *LET* se pak přičte k dávce určené TED, která pochází od částic s vyšším *LET*. Tímto způsobem je získána celková absorbovaná dávka. Celkový dávkový ekvivalent se stanoví součtem upravené dávky TLD (pro nízké *LET* platí $Q = 1$, viz tab. 2.1) a dávkovým ekvivalentem TED. [8]

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° [16] v nadmořské výšce oscilující kolem 400 km rychlostí 28 800 km/h, což znamená, že celou Zem obletí každých 90 min [17]. 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 [16]. 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 [18]. 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 [19]. V tab. 3.1 jsou k dispozici základní parametry stanice.

Tabulka 3.1: Základní parametry ISS [18].

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) [20]; podle dohod s NASA má ESA nárok na 51% využití zdrojů modulu Columbus [16].

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) [22].

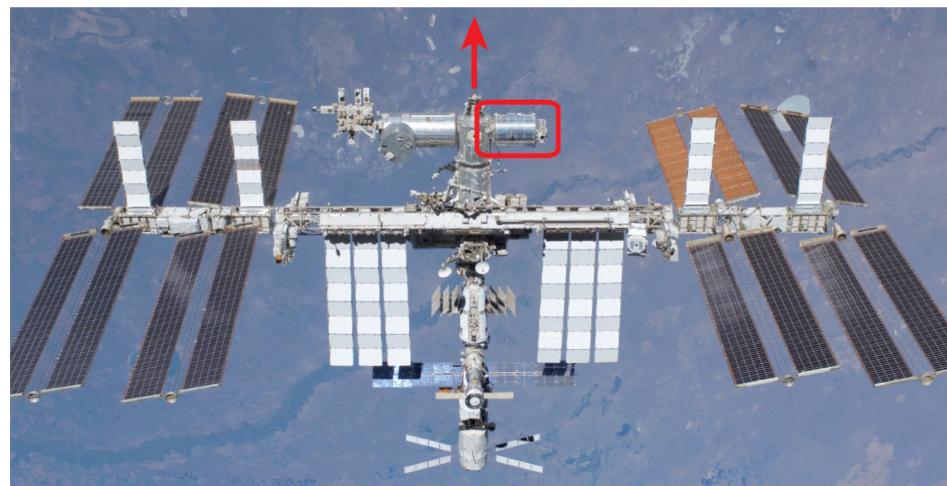
3.1 Modul Columbus

Modul Columbus je největším příspěvkem ESA k ISS.

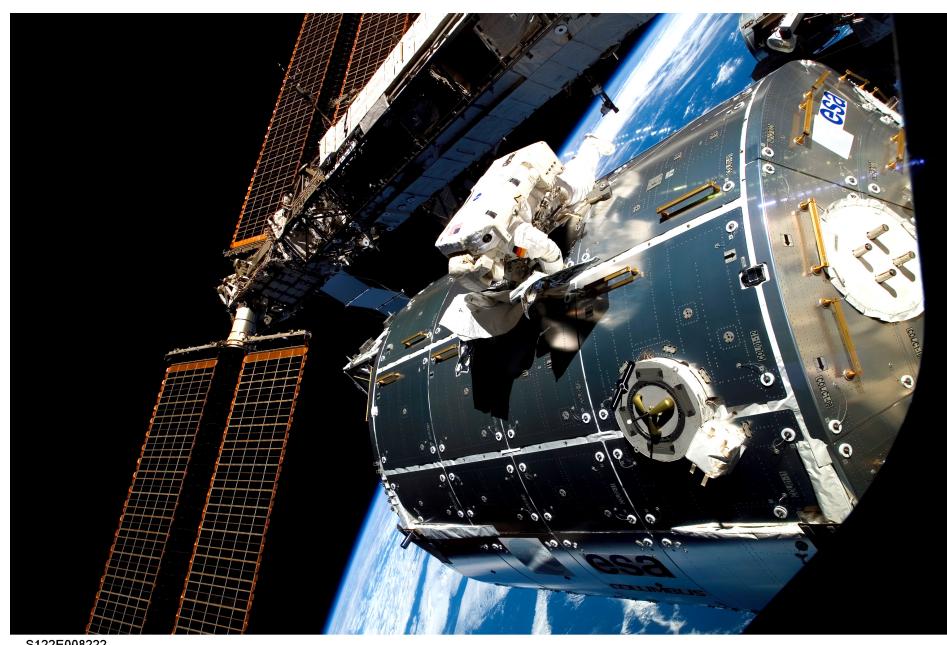
Jedná se o laboratorní modul zaměřený na výzkum v biologii, materiálových vědách, fyziku tekutin a další výzkumy v mikrogravitaci. Obsahuje deset skříňových modulů pro experimenty (International Standard Payload Racks), každý z nich poskytuje nezávislé ovládání energie, chlazení a také komunikaci s pozemními 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). [23].

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 [24].

4. Experimenty DOSIS a DOSIS 3D

Informace v této kapitole byly čerpány převážně ze zdrojů [2, 25].

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 stanovení 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.

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.

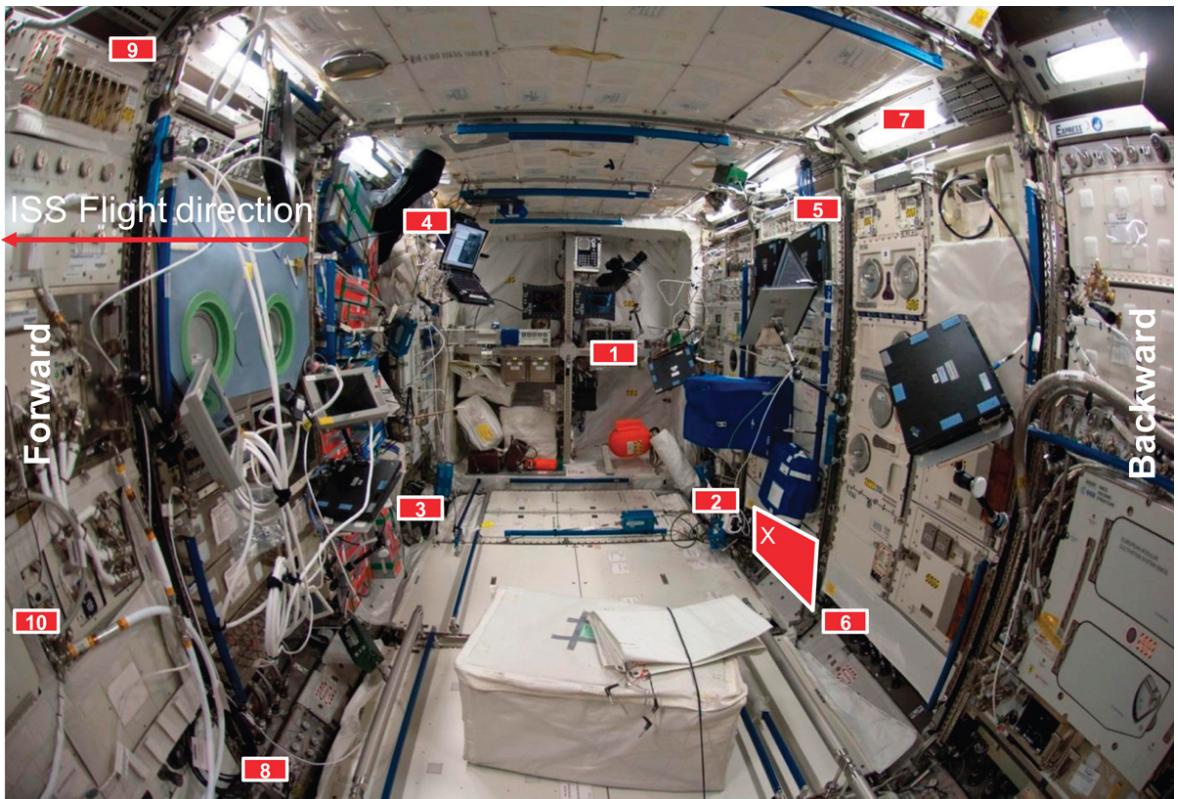
4.1 Rozmístění pasivních detektorů

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 PDP; 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 PDP. Osm PDP 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 obsahovala výše zmíněných 11 PDP. Tab. 4.2 obsahuje informace o obměně sad pasivních detektorů (dopravení na ISS, instalaci, doba používání, ukončení měření, návrat na Zem, nadmořská výška ISS); u sad 7, 8, 9 experimentu DOSIS3D nejsou doposud k dispozici údaje o nadmořské výšce; sada 10 je stále na ISS.

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



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]

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,

Tabulka 4.2: 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 byly umístěny v dané pozici/místě; pokrytí je podíl těchto dvou dob. Poslední sloupec obsahuje rozmezí nadmořské výšky, ve které se ISS v daný časový úsek nacházela [2]. U sad 7,8,9 nejsou dosud k dispozici informace o nadmořské výšce. Na ISS se nyní nachází 10. sada experimentu DOSIS3D.

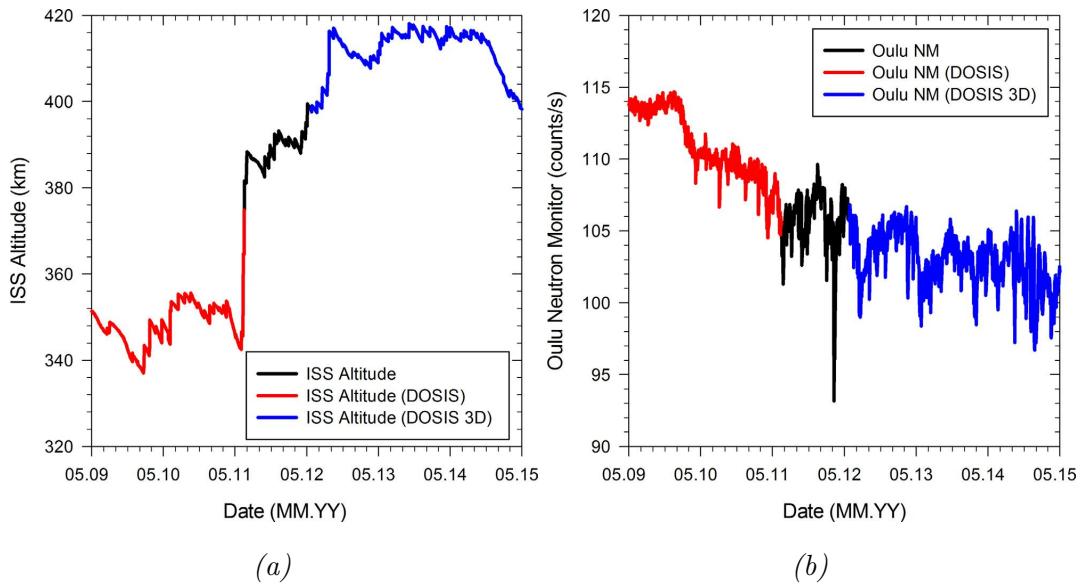
	Sada	Počátek-konec	Doba trvání [dny]	Pokrytí [%]	Nadmořská výška ISS [km]
DOSIS	1	Červenec 2009- Listopad 2009	136 (127)	93,3	339-348
	2	Listopad 2009- Květen 2010	191 (178)	93,2	337-349
DOSIS3D	1	Květen 2012- Září 2012	125 (113)	90,4	397-417
	2	Říjen 2012- Březen 2013	144 (137)	95,1	407-416
	3	Březen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

které nastalo v letech 2013 a 2014.

4.3 Používané detektory

Tento oddíl pojednává o používaných detektorech v experimentech DOSIS a DOSIS3D. Obecné informace o pasivních detektorech (např. jak se určuje absorbovaná dávka a dávkový ekvivalent z naměřených dat; srovnání jednotlivých typů detektorů) jsou v kapitole 2. Pododdíl 4.3.4 obsahuje stručné informace o používaných aktivních detektorech, podrobnější informace lze dohledat v [27, 25].

V experimentech DOSIS a DOSIS3D jsou používány následující tři typy pasivních



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]

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. NPI měří pomocí termoluminiscenčních detektorů a detektorů stop v pevné fázi.

4.3.1 Termoluminiscenční detektory

Používané TL detektory jsou v tabulce 4.3. Ta obsahuje název instituce spolu s názvy a materiály TLD, které jsou danými institucemi používány. Avšak to pro srovnání výsledků z různých TL detektorů nestačí, důležitou roli hrají 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. 4.3) 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 4.3: TL detektory používané různými institucemi. [2]

Institut	Název TLD	Materiál TLD
DLR	TLD-600/700	LiF:Mg,Ti
	TLD-300	CaF ₂ :Tm
ATI	TLD-600/700	LiF:Mg,Ti
	TLD-300	CaF ₂ :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	TLD-100	LiF:Mg,Ti
NASA/SRAG	TLD-100	LiF:Mg,Ti
	TLD-300	CaF ₂ :Tm
NPI	Al ₂ O ₃ :C	Al ₂ O ₃ :C
	CaSO ₄ :Dy	CaSO ₄ :Dy

NPI používá dva TL detektory, Al₂O₃:C a CaSO₄: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 °C/s; první není předehříván, druhý je předehříván na 150 °C (22 s); annealing probíhá 20 minut za 700 °C (Al₂O₃:C), respektive 10 minut za 380 °C (CaSO₄:Dy); ochlazovací rychlosť je vysoká u obou; kalibrování probíhá u obou pomocí ¹³⁷Cs; u obou je vyhodnocována plocha pod vyhřívací křivkou. Oba dva mají průměr roven 5 mm a tloušťku rovnou 1 mm.

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 (Al₂O₃:C), avšak liší se v následujících parametrech: čtecí systém, příkon energie stimulujícího laseru působící 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. 4.4 jsou uvedeny instituce, které TED využívají; tabulka také obsahuje výrobce daného TED. Avšak tato tabulka již není aktuální, jelikož většina institucí přešla v posledních letech na TASTRAK původně využívaný pouze MTA EK. Různorodost využívaných TED a jejich způsobu vyhodnocení totiž komplikovalo vzájemné porovnávání a interpretaci naměřených dat [11]. Důležitými parametry jsou: doba leptání; teplota, při níž leptání probíhá; koncentrace NaOH, jímž se leptalo; odleptaná vrstva; analyzovaná plocha.

Tabulka 4.4: Přehled institucí používající TED, u každé instituce jsou uvedeny výrobci příslušného detektoru. V posledních letech většina institucí přešla k používání TASTRAKu od MTA EK. [2]

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

Metodika vyhodnocování TED používaných NPI je v oddíle 5.1.

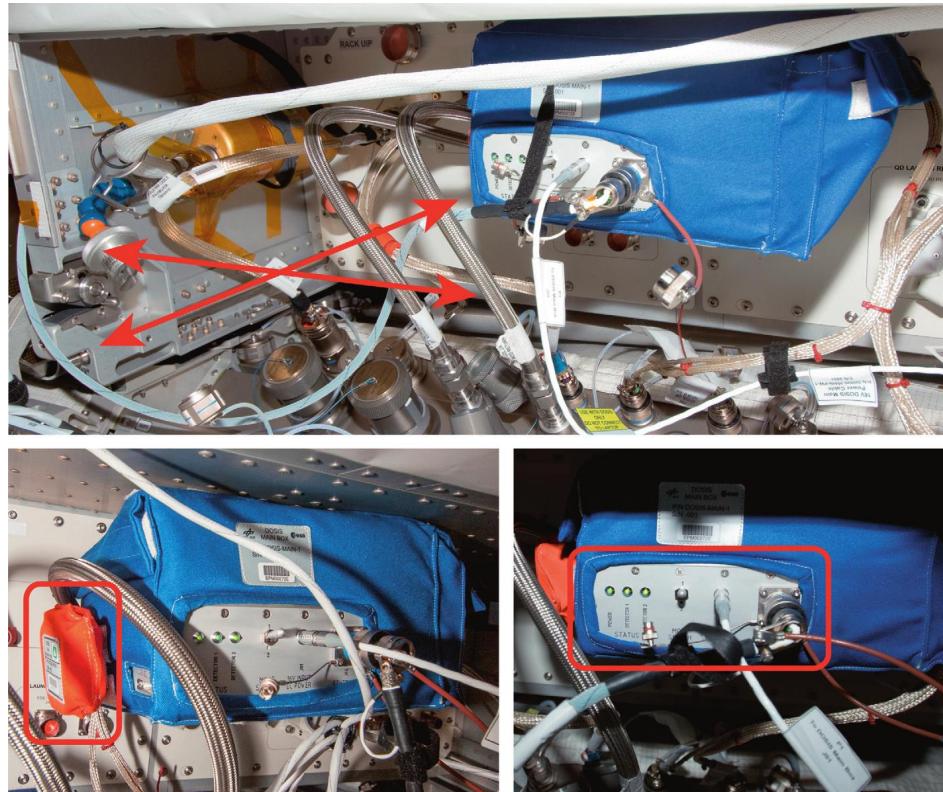
4.3.4 Aktivní detektory DOSTEL

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 [27].

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, 27].



Obr. 4.3: V horním obrázku je vidět modrý box, v němž jsou umístěny oba DOSTEL detektory; šipky ukazují namíření detektorů. Vlevo dole je vidět označený PDP připojený v blízkosti aktivních detektorů, vpravo dole je ukázáno ovládání jednoho DOSTELu. [25]

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.

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 detektorem $^{7}\text{LiF:Mg,Ti}$ v rámci všech osmi vyhodnocených sad. Dále je zmíněno stručné porovnání dat z pasivních a aktivních detektorů a nakonec jsou výsledky srovnány s

daty získaných během jiných experimentů (popsaných ve článcích [6, 8, 10]).

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: ${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$; ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$; $\text{CaF}_2:\text{Tm}$; ${}^{\text{Nat}}\text{LiF:Mg,Ti}$; ${}^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$; ${}^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$; $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 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 nabitych částic každého TL/OSL materiálu (viz oddíl 2.1).

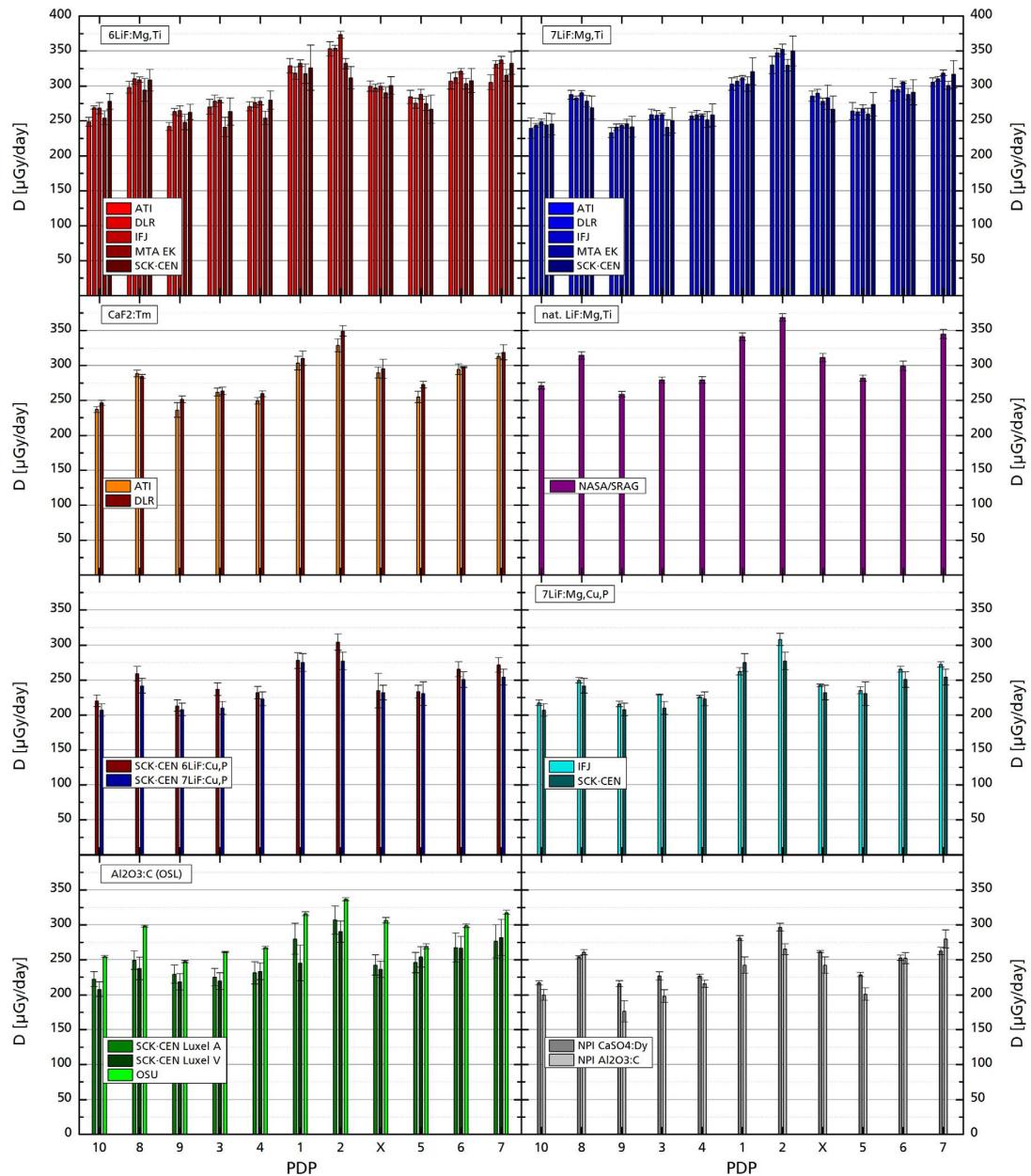
Tabulka 4.5: Poměry odezevu TLD materiálů s odezvou referenčního ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$. Odezvu se myslí určená dávka z daného detektoru [2].

Materiál	Poměr odezev
${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$	1,06
${}^{\text{Nat}}\text{LiF:Mg,Ti}$	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 ${}^6\text{Li}$ 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 (“gamma-equivalent neutron dose”), [2].

V tab. 4.5 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 vyhodnocovacích



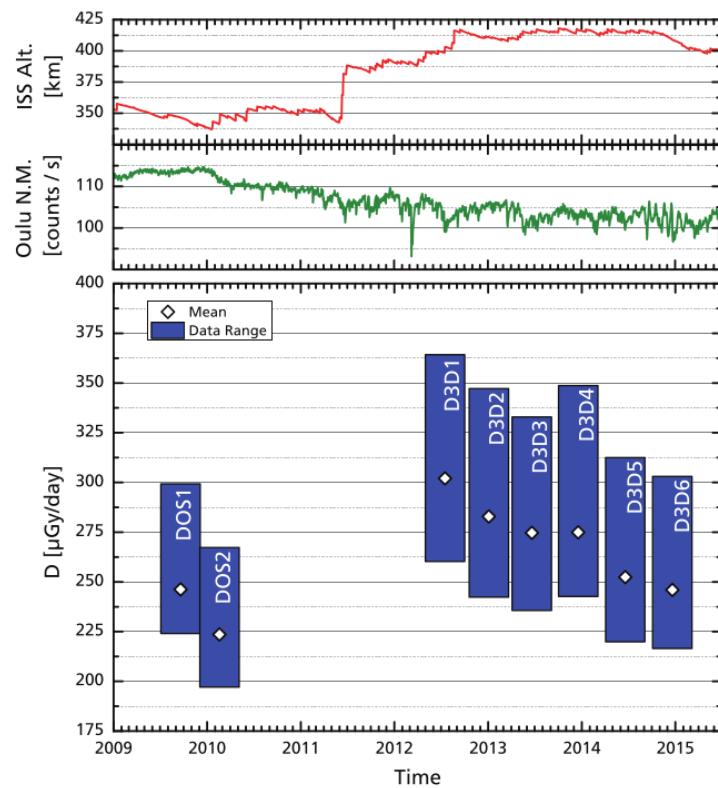
Obr. 4.4: Naměřené dávkové příkony detektory různých materiálů. Na ose x jsou čísla PDP, jejichž pořadí je založeno na poloze PDP v modulu Columbus (viz 4.1) [2].

metod.

4.4.2 Srovnání dat z osmi sad pro jeden druh pasivního detektoru

Srovnávala se data od TLD $^{7}\text{LiF:Mg,Ti}$ ze všech PDP. Obr. 4.5 zobrazuje zprůměrovaný rozsah dávkových příkonů ze všech PDP; průměrování probíhalo pro každé PDP jednotlivě přes příkony určené několika organizacemi. 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 [2].

U všech osmi sad sleduje dávkový příkon stejný vývoj přes 11 PDP jako v druhé sadě DOSIS3D (obr. 4.4). Tento vývoj je dán změnami v tloušťce lokálního stínění pro jednotlivé PDP, které velmi ovlivňují příspěvky od nízkoenergetických protonů při průletech nad SAA (viz oddíl 1.2.5).

Absorbovaná dávka z detektorů, které byly umístěny u čelní stěny vzhledem k pohybu ISS (jedná se o PDP 3, 4, 8, 9, 10), je systematicky menší než absorbovaná dávka z detektorů umístěných u zadní stěny (PDP 1, 2, 5, 6, 7, X) [2]. 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. 4.6 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. 4.2). Hodnoty v tab. 4.6 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 díky krátkému času letu.

Tabulka 4.6: 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	248 ± 20	261 ± 21
	2	234 ± 18	238 ± 10
DOSIS3D	1	286 ± 25	311 ± 9
	2	288 ± 20	281 ± 9
	3	297 ± 23	294 ± 7
	4	294 ± 23	294 ± 12
	5	279 ± 22	262 ± 7
	6	256 ± 20	256 ± 7

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

4.4.4 Srovnání s jinými experimenty

- Na různých místech v americké části ISS jsou od organizace NASA/SRAG umístěné tzv. monitory prostorového rozložení záření (RAM, Radiation Area Monitor), které obsahují termoluminiscenční detektory ($^7\text{LiF}: \text{Mg}, \text{Ti}$) a slouží ke stanovení prostorové distribuce dávky v ISS [28]. Můžeme tedy srovnávat jejich výsledky s výsledky DOSIS/DOSIS3D. RAM detektory měřily na ISS od dubna 2014 do listopadu 2014, celkem 218 dní; tato doba pokrývá pátou a částečně i šestou sadu DOSIS3D (tab. 4.2). V modulu Columbus byly naměřeny dávkové příkony v rozsahu $[216 \pm 8; 313 \pm 9] \mu\text{Gy}/\text{den}$, v rámci programu RAM bylo rozpětí naměřených dávkových příkonů $[201 \pm 5; 421 \pm 12] \mu\text{Gy}/\text{den}$. Minimum je tedy přibližně stejné, avšak maximum je vyšší pro RAM. To bylo naměřeno v blízkosti okénka, a tudíž ho lze spojit s nižším stíněním. Celkově lze z těchto srovnání tvrdit, že dávkové příkony se v jednotlivých modulech mohou v závislosti na lokálním stínění lišit až dvojnásobně. [2]
- V letech 2007 a 2009 probíhalo měření spadající pod experiment MATROSHKA-R pomocí TLD (Al-P) a TED (HARZLAS TD-1, Page) v Ruském provozním modulu Zvezda (informace o modulu jsou k dohledání např. v [29]) a v modulu Pirs ([30]); více o průběhu měření viz tab. 4.7. Detektory byly v obou případech umístěny v šesti tzv. SPD (sborka passivních detektorov, obdoba PDP u DOSIS&DOSIS3D), přičemž dva SPD se nacházely v Pirs modulu a čtyři ve Zvezdě. Srovnejme nyní

Tabulka 4.7: Časový vývoj měření v ruských modulech Zvezda a Pirs. [6]

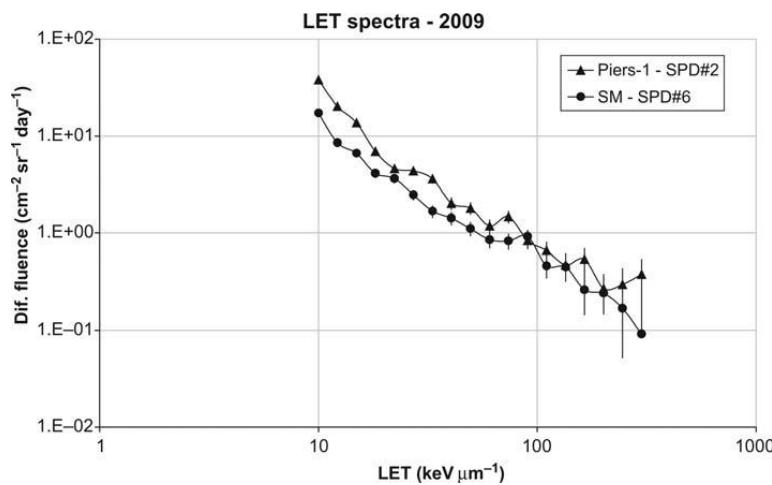
Fáze	Počátek-konec	Doba trvání [dny]	Nadmořská výška ISS [km]
1	Květen-Říjen 2007	163	338-353
2	Květen-Říjen 2009	158	350-361

data od TLD Al-P z druhé fáze experimentu MATROSHKA-R (viz tab. 4.8) s daty od TLD $^7\text{LiF}: \text{Mg}, \text{Ti}$ z první sady projektu DOSIS, která byla nainstalována v modulu Columbus od července 2009 do listopadu 2009 (dávkové příkony přibližně v rozmezí od 225 do 300 $\mu\text{Gy}/\text{den}$, viz obr. 4.5). Dávkové příkony z modulu Pirs jsou jasně nejvyšší, poté následují dávkové příkony z modulu Zvezda; horní hranice rozsahu dávkových příkonů z modulu Columbus odpovídá minimální hodnotě naměřené ve Zvezdě. Rozdíl mezi Pirsem a Zvezdou je dán rozdílem v tloušťce

Tabulka 4.8: Naměřené dávkové příkony TL detektorem Al-P při druhé fázi experimentu MATROSHKA-R v roce 2009. První dva SPD byly umístěny v modulu Pirs, ostatní ve Zvezdě. [6]

SPD	D [$\mu\text{Gy}/\text{den}$]
1	445 ± 31
2	417 ± 29
3	368 ± 26
4	387 ± 27
5	321 ± 22
6	301 ± 21

stínění [6]. Stínění zcela určitě hrálo roli také v naměření mnohem nižší dávky v modulu Columbus, avšak zde není srovnání tolik relevantní, jelikož se jedná o data naměřená různými TLD (tj. mají různou účinnost). Na obr. 4.6 jsou srovnána LET spektra z modulu Pirs (SPD 2) a z modulu Zvezda (SPD 6); je zcela jasné vidět, že méně stíněný Pirs obdržel větší dávku od částic s $LET < 100 \text{ keV}/\mu\text{m}$, u částic s vyšším LET žádný rozdíl není [6]. (Poznámka: lze srovnat obr. 4.6 s obr. 1.5 – rozdíl ve spektrech je způsoben tím, že první obr. představuje diferenciální spektrum, zatímco druhý zobrazuje integrální spektrum.)



Obr. 4.6: LET spektra z dat naměřených v modulu Pirs (Piers-1) a v modulu Zvezda (SM) v příslušných SPD. [6]

- Lepší srovnání poskytuje měření z roku 2012, které také proběhlo v rámci MATROSHKA-R. Bylo prováděno TL detektorem CaSO_4 , který byl umístěn

na šesti pozicích v ruské části ISS (jeden byl v modulu Pirs, jeden v ruském výzkumném modulu [31] a čtyři v modulu Zvezda). Měření započalo v květnu 2012 a probíhalo jeden rok, což odpovídá první a druhé sadě experimentu DOSIS3D. Průměrný dávkový příkon naměřený ve Zvezdě je roven $262 \mu\text{Gy}/\text{den}$, což je velmi blízké hodnotě průměrného dávkového příkonu naměřeného v rámci DOSIS3D (TL detektorem $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$), který je roven $275 \mu\text{Gy}/\text{den}$. Data z Pirsu a výzkumného modulu dosahují hodnot okolo $500 \mu\text{Gy}/\text{den}$, jedná se zase o důsledek nižšího stínění. Z uvedených informací (i z předchozích odrážek) plyne, že za předpokladu stálosti nadmořské výšky a dalších parametrů jsou rozdíly v dávkách dány hlavně stíněním celého objektu, menší rozdíly jsou pak způsobeny lokálním stíněním (které je představováno např. uloženými zásobami, přístroji). [10]

- Jako poslední uvedeme srovnání s daty, které byly naměřeny v jiné nadmořské výšce. Satelit BION-M1 byl vypuštěn 19. dubna 2013 a na orbitě o nadmořské výšce 575 km setrval 30 dní. Obsahoval mj. biologické vzorky a detektory, konkrétně TLD $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ a TED HARZLAS TD-1. Ty byly uloženy ve čtyřech boxech uvnitř satelitu a ve dvou boxech na vnějším plášti satelitu. Průměr z dávkových příkonů naměřených ve vnitřních boxech pomocí TLD činí $967 \mu\text{Gy}/\text{den}$, ve vnějších boxech $2,2 \text{ mGy}/\text{den}$. Nadmořská výška ISS byla přibližně 409 km a v modulu Columbus byl naměřen dávkový dávka cca $275 \mu\text{Gy}/\text{den}$, viz předchozí odrážka. Tyto obrovské rozdíly v naměřených hodnotách ukazují důležitost vlivu změny nadmořské výšky (ISS proti BION-M1, ovšem dále je třeba vzít v úvahu, že BION-M1 měl méně stínění) a stínění (vnitřek proti vnějšku satelitu BION-M1). [10]

5. Vyhodnocení detektorů stop v pevné fázi (praktická část)

5.1 Metodika

NPI používá HARZLAS TD-1 a od roku 2016 i TASTRAK. HARZLAS TD-1 je leptán 18 hodin za teploty 70°C v 5 N koncentrovaném roztoku NaOH; odleptaná vrstva je kolem $15,3\ \mu\text{m}$. Většinou 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 částic 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°C v 6,25 N koncentrovaném roztoku NaOH, odleptaná vrstva je tlustá $7,5/20,1\ \mu\text{m}$; zpravidla se analyzuje plocha o velikosti $0,5\ \text{cm}^2$ (v obou případech) z důvodu zajištění dostatečné statistiky. Po leptání následuje u obou detektorů nasnímání stop lineárním snímacím zařízením s vysokým rozlišením (které je součástí mikroskopu HSP-1000, [32]), poté jsou snímky se stopami analyzovány programem HspFit.

Zatímco HARZLAS TD-1 detekuje částice s *LET* vyšším než $7\ \text{keV}/\mu\text{m}$, TASTRAK má detekční práh $20\ \text{keV}/\mu\text{m}$. Na druhou stranu TASTRAK má vyšší rozsah měřitelných *LET* a díky leptání per partes detekuje s mnohem větší účinností částice s vyšším *LET* než HARZLAS TD-1 [11].

5.2 Vyhodnocení

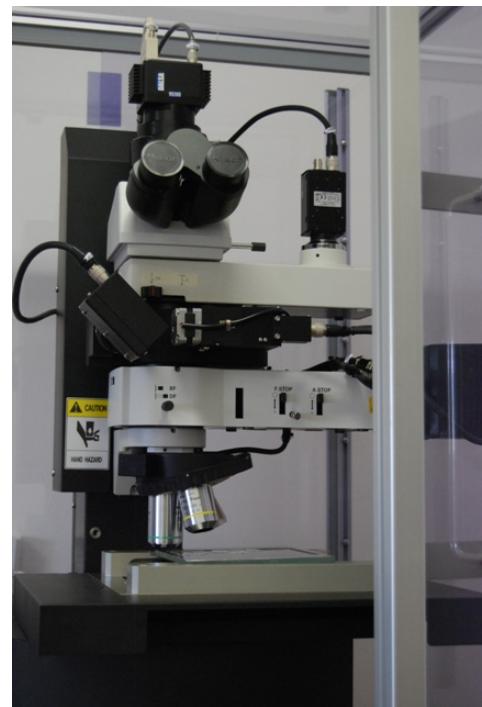
V praktické části bakalářské práce jsem vyhodnotil tři detektory stop osmé sady experimentu DOSIS3D. Detektory byly umístěny v prvním, druhém a třetím PDP. Jedná se o detektory z materiálu TASTRAK, které byly leptány 6 hodin, tj. zobrazené stopy jsou původem od častic s krátkým dosahem a vyšším LET.

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

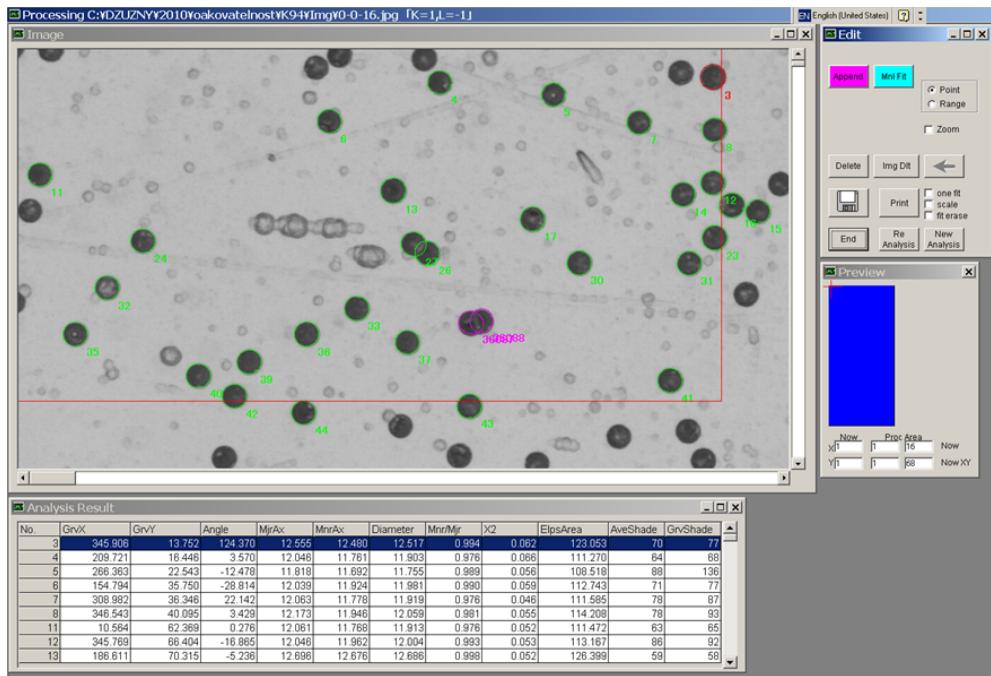
Vyhodnocovat jsem započal analýzou stop v programu HspFit. Tento program sám vyhodnotí a zaznamená při dobrém nastavení určitých parametrů většinu stop, zbytek se musí označit ručně, což je zdlouhavá práce. Stopy se zaznamenávají tak, že se jejich okraj fituje elipsou, přičemž parametry fitu představují 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 počítačem, fialově stopy zaznamenané uživatelem. Dále lze pozorovat, že některé stopy ještě zaznamenány nebyly.

V obr. 5.3 jsou uvedeny jednotlivé snímky z povrchu náhodně vybraného detektoru. V (a) je snímek, který obsahuje čisté stopy; v (b) ukazuje červená šipka poškození materiálu nepocházející od ozáření ionizujícím zářením, které by mohl neznalý uživatel vyhodnotit jako vícero stop; v (c) taktéž ukazuje červená šipka poškození materiálu jiného charakteru. Obr. 5.4 pak ukazuje snímky, na nichž je naskenována plocha, která byla fyzicky znehodnocena člověkem (označení detektoru vyrytím X).

Osy všech elips byly spolu s dalšími parametry fitů (např. sklon elipsy) uloženy v souboru s příponou .nap. Tato data byla zpracována skriptem napsaném v programovacím jazyce Python, jehož výstupem jsou tři soubory. První soubor obsahuje údaje o poloze stopy, os fitované elipsy, poměru leptacích rychlostí V , korekčním součiniteli k_θ ,



Obr. 5.1: Vysoko rychlostní optický mikroskop HSP-1000. [32]



Obr. 5.2: Okno programu HspFit; zeleně jsou označeny fity vygenerované počítačem a fialově fity vytvořené uživatelem. [32]

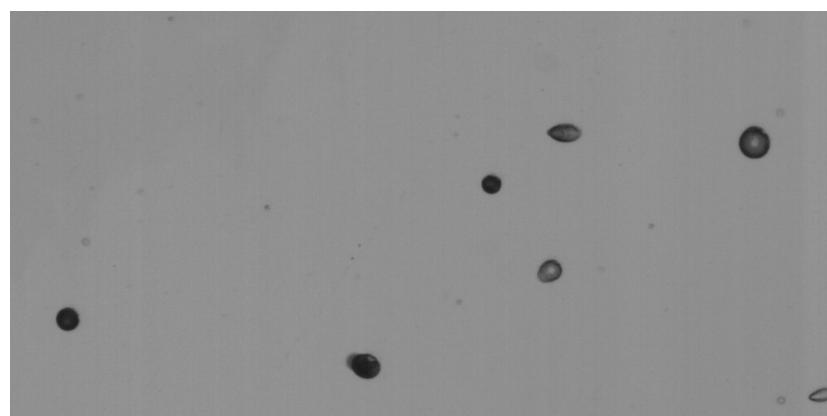
lineárním přenosu energie LET , dávce a dávkovém ekvivalentu každé stopy. Druhý soubor obsahuje celkovou dávku a dávkový ekvivalent, které se absorbovaly v detektoru i s jejich příkony. Třetí soubor obsahuje data potřebná k vytvoření diferenciálních LET spekter; z těchto dat jsem pomocí programu Gnuplot vytvořil LET spektra (obr. 5.6, 5.7, 5.8 a 5.9 v příloze). 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

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

kde LET vychází v $\text{keV}/\mu\text{m}$; závislost byla přebrána z [15]. Kalibrační křivka je také k nahlédnutí na obr. 5.5. Z LET všech částic jsou dále vypočítány dávka a dávkový ekvivalent dle vztahů (2.5) a (2.6). Díky známému času doby měření můžeme určit příkony těchto veličin, tj. \dot{D}, \dot{H} .

Původní Python skript, který jsem obdržel od vedoucí práce, neposkytoval data pro LET spektra a nevypočítával \dot{D}, \dot{H} . Pro tyto účely jsem ho musel doplnit.

V tab. 5.1 je velikost analyzované plochy a počet analyzovaných stop všech tří detektorů.



(a)

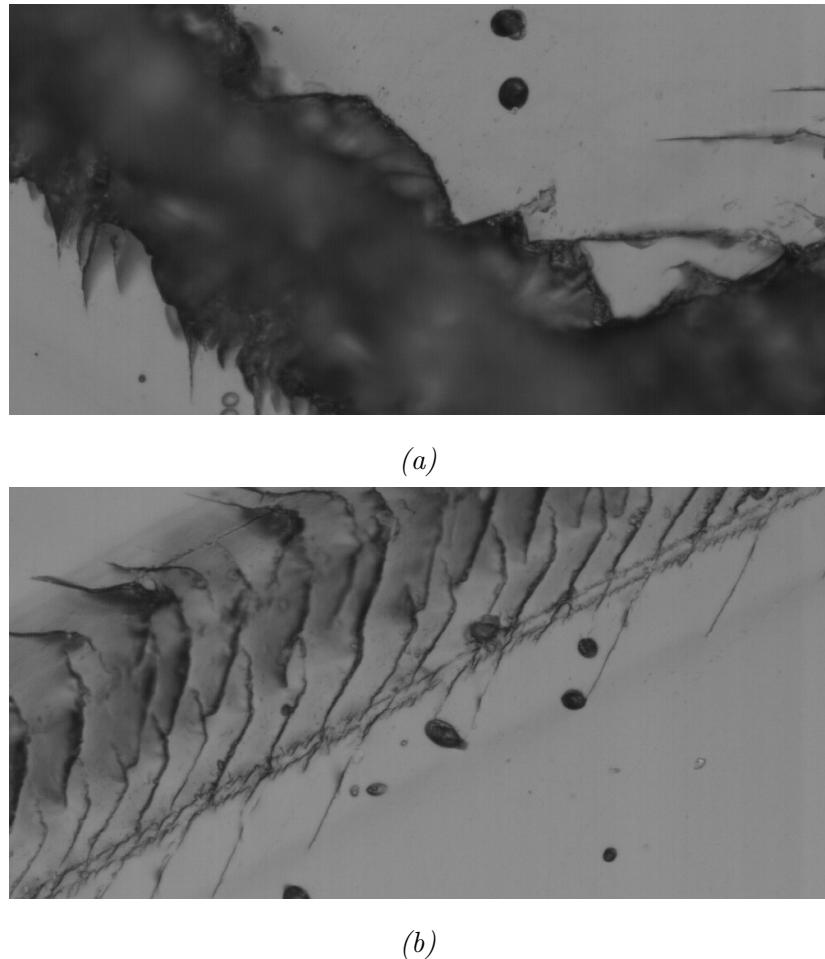


(b)



(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.



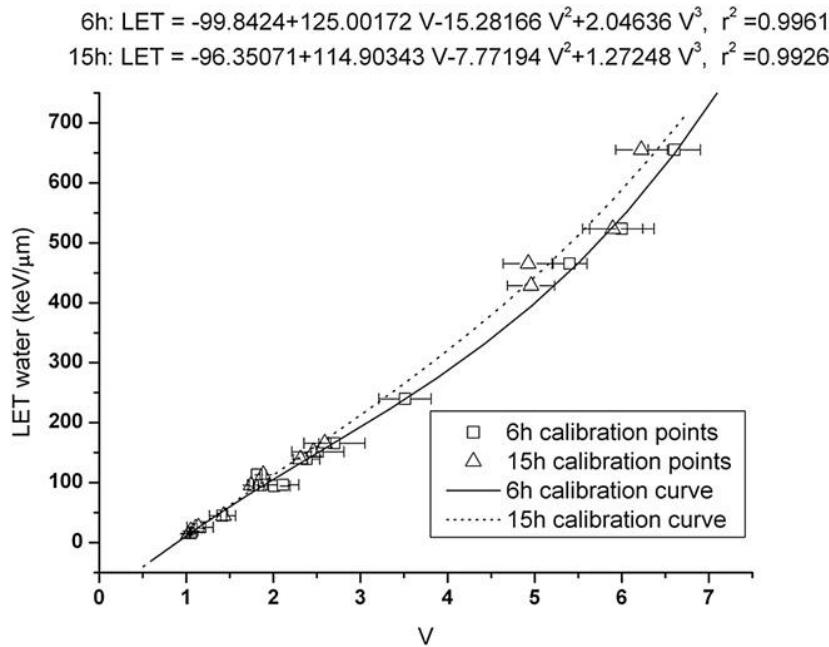
Obr. 5.4: Naskenované snímky zobrazující poškozené části plochy detektoru vyrytím značky X.

Tabulka 5.1: Velikost analyzované plochy a počet analyzovaných stop všech tří detektorů.

PDP	Analyzovaná plocha [mm ²]	Počet analyzovaných stop [-]
1	13,35	1387
2	14,03	1267
3	13,66	1084

Tab. 5.2 obsahuje hledané celkové dávky a dávkové ekvivalenty i s jejich příkony (detektory byly umístěny na pozicích 180 dní); do vyhodnocení nebyly zahrnuty stopy s $LET > 1000$ (kvůli rozsahu kalibrační křivky). Určení nepřesnosti je probráno dále v textu.

Na obrázcích 5.6, 5.7, 5.8 a 5.9 jsou mnou vytvořena diferenciální LET spektra pro různé veličiny; LET intervaly byly zvoleny tak, aby byly na logaritmické ose ekvidistantní. První spektrum zobrazuje počet stop (detekovaných částic) spadnuvších do jednotlivých



Obr. 5.5: Kalibrační křivky pro TASTRAK leptaný 6, resp. 15 hodin. Obrázek obsahuje i kalibrační body. Kalibrační křivky pocházejí od MTA EK, [15].

Tabulka 5.2: Celkové dávky D , dávkové ekvivalenty H a příkony \dot{D} , \dot{H} určené vyhodnocovanými detektory (doba měření=180 dní).

PDP	D [mGy]	H [mSv]	\dot{D} [μ Gy/den]	\dot{H} [μ Sv/den]
1	5 ± 1	90 ± 20	30 ± 6	500 ± 100
2	5 ± 1	90 ± 20	28 ± 6	500 ± 100
3	4 ± 1	80 ± 20	24 ± 5	400 ± 100

LET intervalů. Třetí, resp. čtvrté spektrum zobrazuje, jakou dávkou, resp. dávkovým ekvivalentem přispěly částice v daném LET intervalu do celkově obdržené dávky, resp. dávkového ekvivalentu. Druhé spektrum znázorňuje diferenciální fluenci Φ častic s LET v daném intervalu; Φ je definována vztahem

$$\Phi = \frac{d^2N}{dAd\Omega}, \quad (5.2)$$

kde dN je počet častic, které dopadly na kouli s příčným řezem o obsahu dA pod prostorovým úhlem $d\Omega$. K výpočtu Φ_i pro daný LET interval se používá vztah

$$\Phi_i = \frac{N_i}{2\pi A \cos^2 \theta_{k,i}}, \quad (5.3)$$

kde N_i je počet stop s LET v příslušném intervalu, A je detekční plocha, $\cos^2 \theta_{k,i} = \frac{V_i^2 - 1}{V_i^2}$ a V_i je průměrná leptací rychlosť uvažovaných stop [15].

LET spektra jsou zatížena nepřesností, která pochází např. z nehomogenity materiálu detektoru a jeho tloušťky, rozdílů v koncentraci leptacího roztoku a v teplotách, nedokonalého smytí hydroxidu po leptání, výkonem vyhodnocovacího operátora [33]. Nechť Δn je počet částic v jednom z *LET* intervalů. Lze uvažovat model [33], kdy nepřesnost určení Δn pochází ze tří zdrojů:

- nepřesnost $u_1(\Delta n)$ spojená s náhodností detekce částice, která má Poissonovo rozdělení, tj. $u_1 = \sqrt{\Delta n}$;
- nepřesnost $u_2(\Delta n)$ vyplývající z nepřesnosti kalibrační křivky, tj. závislosti $LET(V)$;
- nepřesnost $u_3(\Delta n)$ spojená s odezvou detektoru.

Velikost u_2 jde zjistit pomocí známého vztahu pro výpočet nepřesností nepřímo měřených veličin

$$u^2(f) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} u(x) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} u(y) \right)^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} u(x, y), \quad (5.4)$$

kde $f = f(x, y)$ a $u(x), u(y)$ jsou příslušné chyby, $u(x, y)$ je kovariance veličin x, y ; tedy pro u_2

$$u_2(\Delta n) \approx \frac{\Delta n}{\Delta LET} u(LET), \quad (5.5)$$

kde ΔLET je délka uvažovaného intervalu a $u(LET)$ je nepřesnost určení lineárního přenosu energie z kalibrační křivky, která se zjistí také použitím vztahu (5.4) pro $LET(V)$; diferenciály jsou z důvodu jednoduchosti a praktičnosti approximovány na $\Delta n, \Delta LET$. Poměr leptacích rychlostí závisí na a, b, d , tzn. na osách elipsy (stopy) a tloušťce odleptané vrstvy. Chyba V se určí zase podle vztahu (5.4) pro $V(a, b, d)$. Kovariance $u(a, d)$ a $u(b, d)$ jsou brány jako nulové, jelikož se nedají snadno určit; vzhledem k zápornosti příslušných parciálních derivací tímto krokem $u(V)$ nadhodnocujeme. Určení $u(a), u(b), u(a, b), u(d)$ spolu s tzv. očekávanými hodnotami a, b, d je podrobně rozebráno v [33].

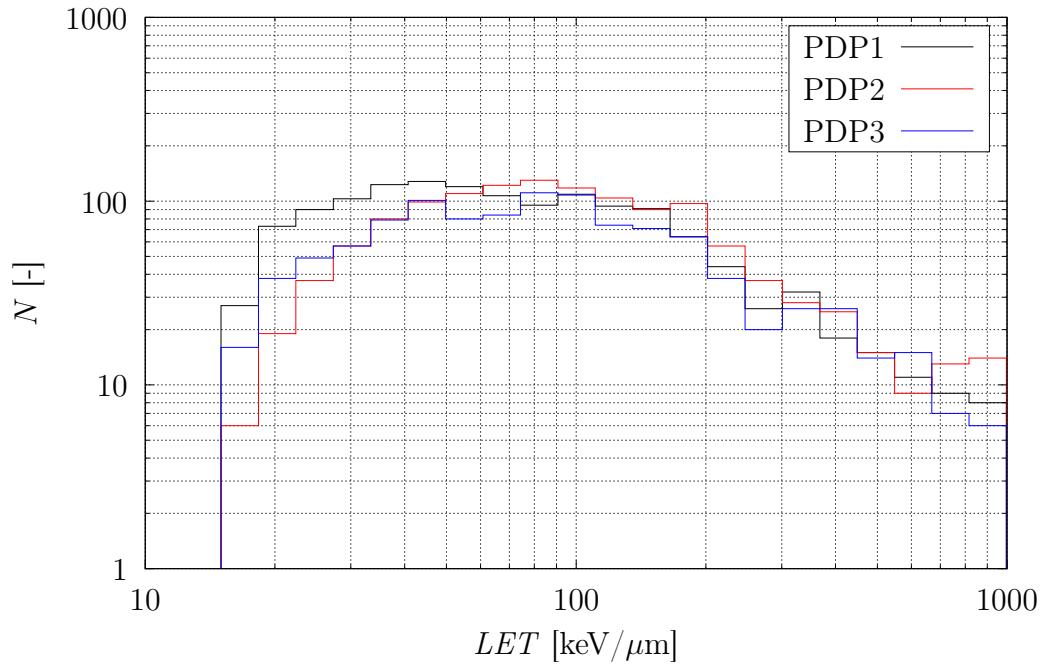
Třetí složka nejistot u_3 se dá určit jen v některých situacích, viz [33].

Chyba určení dávky D_i od N_i častic s lineárním přenosem energie LET_i se zjistí aplikací vztahu (5.4) pro $D_i(LET_i, N_i)$, tedy

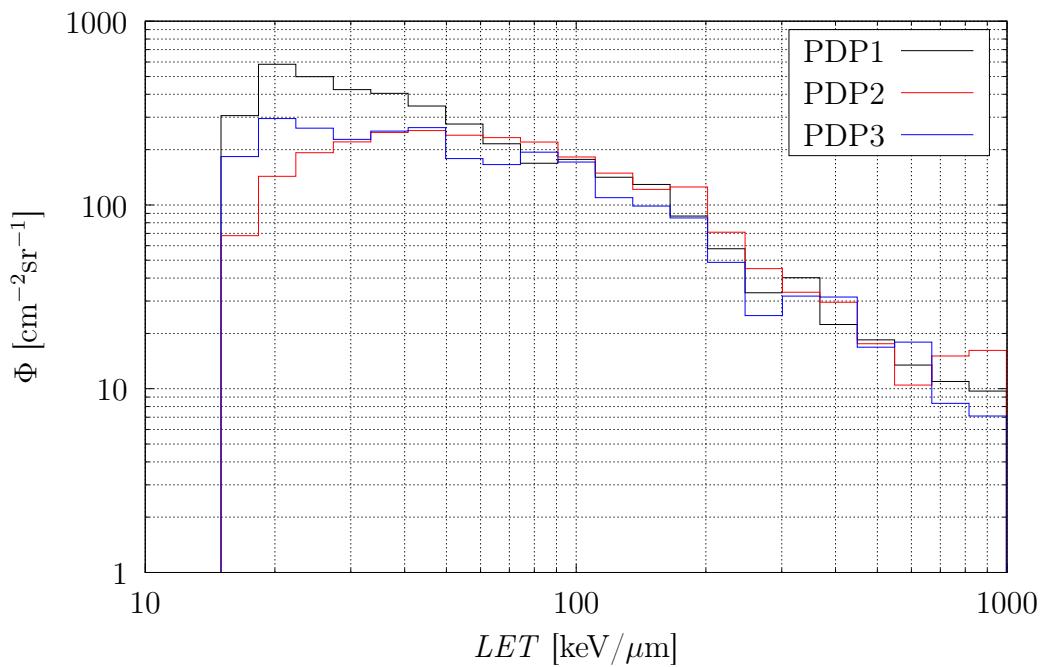
$$u(D_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial D_i}{\partial LET_i} u(LET_i) \right)^2 + \left(\frac{\partial D_i}{\partial N_i} u(N_i) \right)^2}, \quad (5.6)$$

kde vzhledem k Poissonovu rozdělení náhodné veličiny N_i je $u(N_i) = \sqrt{N_i}$, [13]; $u(LET_i)$ se určí způsobem popsaným výše. Nepřesnost dávkového ekvivalentu se zjistí obdobně.

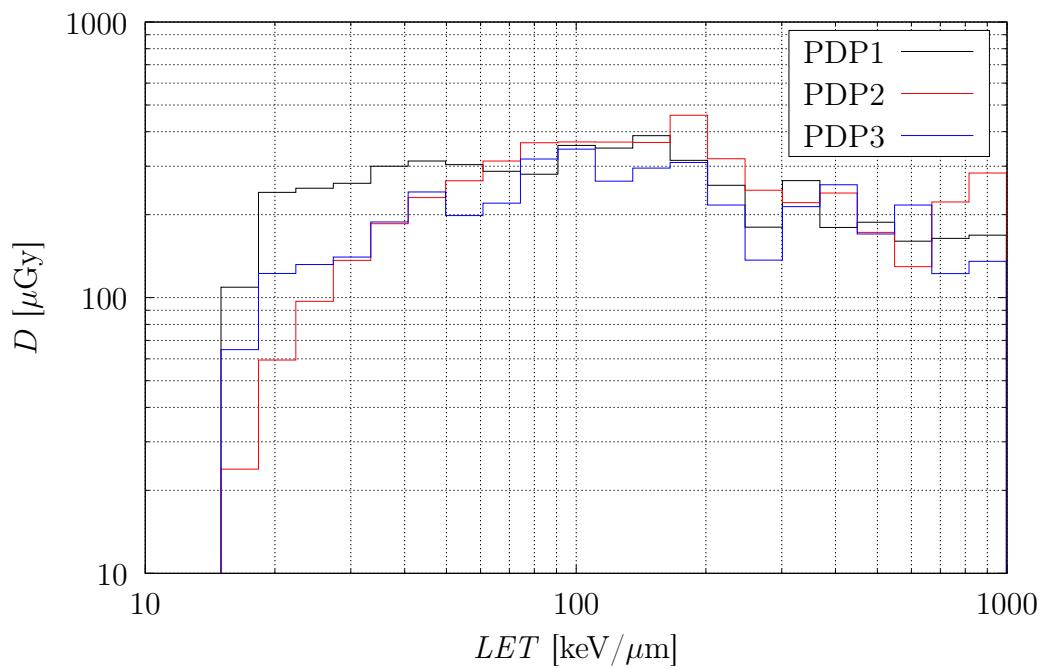
Do *LET* spekter jsem nepřesnosti nezahrnul. Z výsledků článku [33] a z rad od vedoucí práce jsem relativní chybu dávky a dávkového ekvivalentu stanovil na 20 % (absolutní odchylky viz tab. 5.2).



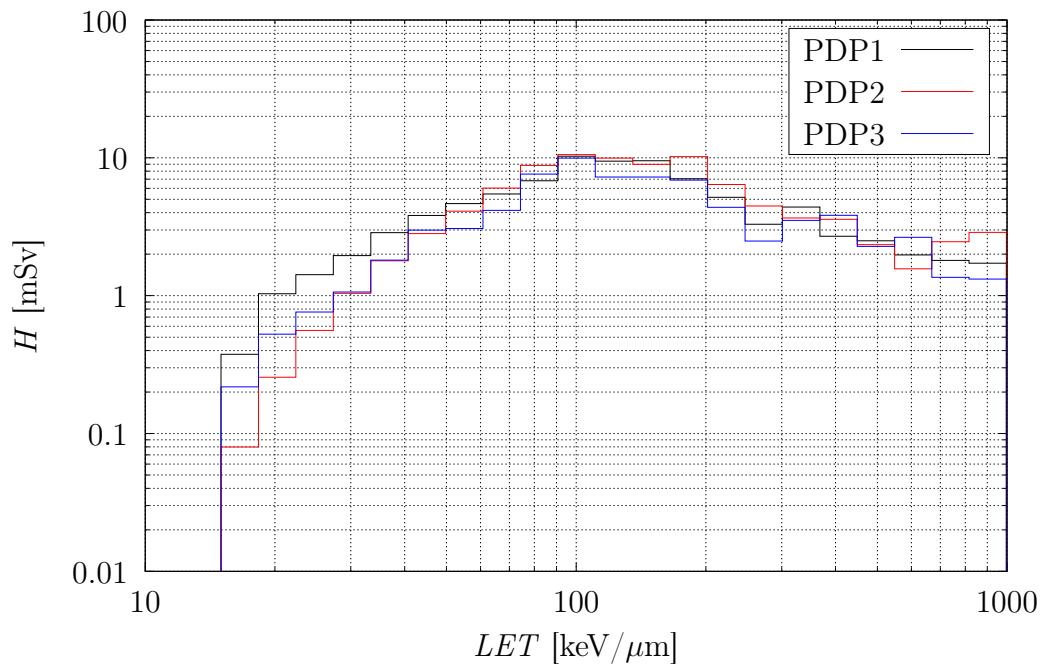
Obr. 5.6: LET spektra vyhodnocených detektorů, na vertikální ose je počet stop v intervalu.



Obr. 5.7: LET spektra detektorů pro fluenci.



Obr. 5.8: LET spektra detektorů pro dávku.



Obr. 5.9: LET spektra detektorů pro dávkový ekvivalent.

5.3 Diskuze

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. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Solar Cycle* [online]. 2017 [cit. 2017-06-11].
Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle.

4. 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.

5. 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>.

6. 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.

7. 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).
8. AMBROŽOVÁ, I.; SHURSHAKOV, V. A.; TOLOCHEK, R. V.; BRABCOVÁ, K. Pachnerová; KUBANČÁK, J.; VLČEK, B.; SPURNÝ, F. Monitoring onboard of iss with passive detectors – 5 years experience. In: GRIGORIEV, A.I.; ZELENY, L.M. (ed.). *Space Weather Effects on Humans: in Space and on Earth*. Moskva, 2013, sv. 1, s. 284–291. Dostupné také z: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013breus1.pdf>.
9. YOUNG, D. A. Etching of Radiation Damage in Lithium Fluoride. *Nature*. 1958, roč. 182, s. 375–377. Dostupné z DOI: [10.1038/182375a0](https://doi.org/10.1038/182375a0).
10. AMBROŽOVÁ, Iva; BRABCOVÁ, Kateřina Pachnerová; KUBANČÁK, Jan; ŠLEGL, Jakub; TOLOCHEK, Raisa V.; IVANOVA, Olga A.; SHURSHAKOV, Vyacheslav A. Cosmic radiation monitoring at low-Earth orbit by means of thermoluminescence and plastic nuclear track detectors. *Radiation Measurements*. 2016, s. -. ISSN 1350-4487. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.12.004>.
11. 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.
12. 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).
13. 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.

14. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *CR-39* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25].
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/CR-39>.
15. 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.
16. WIKIPEDIE, 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%A1%C3%A1Drn%C3%A1Stanice.
17. 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.
18. GARCIA, Mark. *Station Facts and Figures* [online]. 2016 [cit. 2017-04-17].
Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures>.
19. 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>.
20. 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.
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. *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.
23. 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.

24. 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.
25. 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).
26. USOSKIN, Ilya. *Cosmic Ray Station of the University of Oulu* [online].
[Cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://cosmicrays.oulu.fi>.
27. 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).
28. NASA. *Radiation Area Monitor (RAM) - 11.22.16* [online]. [Cit. 2017-06-19].
Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/236.html.
29. NASA. *Russian Service Module* [online]. 2015 [cit. 2017-06-19]. Dostupné z:
https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_417.html.
30. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Pirs (ISS module)* [online]. 2017 [cit. 2017-06-19].
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pirs_\(ISS_module\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pirs_(ISS_module)).
31. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Russian Research Module* [online].
2016 [cit. 2017-06-20].
Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Russian_Research_Module.
32. AVČR, ODZ ÚJF. *Mikroskop HSP-1000* [online]. [Cit. 2017-05-13]. Dostupné z:
<http://cesky.odz.ujf.cas.cz/home/vybaveni/mikroskop-hsp-1000>.
33. BRABCOVÁ, Kateřina Pachnerová; AMBROŽOVÁ, Iva; KOLÍSKOVÁ, Zlata; MALUŠEK, Alexandr. Uncertainties in linear energy transfer spectra measured with track-etched detectors in space.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2013, roč. 713, s. 5–10.
ISSN 0168-9002.

Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.03.012>.