

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. Za účelem stanovení prostorové distribuce dávky uvnitř Mezinárodní kosmické stanice proběhlo a probíhá mnoho experimentů. Patří mezi ně i experimenty DOSIS (2009–2011) a DOSIS3D (2012–doposud). Z naměřených dat lze 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. V neposlední řadě 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 represent enormous health risk during the expeditions in the space. Passive detectors are widely used for its measurement, especially thermoluminescent detectors and solid state nuclear track detectors. Many experiments dealing with the determination of the dose distribution inside the International Space Station are currently running and a lot of them were done in the past. Experiments DOSIS (2009–2011) and DOSIS3D (2012–so far) are two of them. The measured data can provide informations about influence of several parameters (for example solar activity and altitude) to the dose rate. This thesis includes information about characteristics of the cosmic rays in low Earth orbit, about passive detectors used in space measurements, about experiments DOSIS and DOSIS3D. Finally, there is involved the evaluation of three track etched detectors which were placed in the Columbus module.

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

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>1 Kosmické záření v blízkém okolí Země</b>	<b>10</b>
1.1 Zdroje kosmického záření v blízkém okolí Země . . . . .	11
1.1.1 Galaktické kosmické záření . . . . .	11
1.1.2 Zemské radiační pásy . . . . .	12
1.1.3 Sluneční události s emisí částic . . . . .	13
1.1.4 Sekundární částice . . . . .	14
1.2 Faktory ovlivňující kosmické záření v blízkém okolí Země . . . . .	14
1.2.1 Fáze slunečního cyklu . . . . .	14
1.2.2 Sklon oběžné dráhy . . . . .	14
1.2.3 Nadmořská výška . . . . .	15
1.2.4 Východní/západní anizotropie zachycených protonů . . . . .	15
1.2.5 Stínění . . . . .	16
<b>2 Pasivní detektory používané k monitorování kosmického záření</b>	<b>18</b>
2.1 Termoluminiscenční detektory . . . . .	18
2.2 Detektory stop v pevné fázi . . . . .	20
2.2.1 Vyhodnocování . . . . .	22
2.3 Kombinace dat z TLD a TED . . . . .	24
<b>3 Mezinárodní kosmická stanice</b>	<b>25</b>
3.1 Modul Columbus . . . . .	26
<b>4 Experimenty DOSIS a DOSIS 3D</b>	<b>28</b>
4.1 Rozmístění pasivních detektorů . . . . .	29
4.2 Průběh experimentů . . . . .	30

---

4.2.1	Vývoj nadmořské výšky a slunečního cyklu . . . . .	31
4.3	Používané detektory . . . . .	32
4.3.1	Termoluminiscenční detektory . . . . .	32
4.3.2	Opticky stimulované luminiscenční detektory . . . . .	33
4.3.3	Detektory stop v pevné fázi . . . . .	33
4.3.4	Aktivní detektory DOSTEL . . . . .	34
4.4	Data z luminiscenčních detektorů . . . . .	35
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
<b>5</b>	<b>Vyhodnocení detektorů stop v pevné fázi (praktická část)</b>	<b>45</b>
5.1	Metodika . . . . .	45
5.2	Vyhodnocení . . . . .	46
5.3	Diskuze . . . . .	54
<b>Závěr</b>		<b>56</b>
<b>Seznam literatury</b>		<b>62</b>
<b>A Python skript pro vyhodnocování stop</b>		<b>63</b>

# Úvod

Kosmické záření představuje veliké riziko pro zdraví posádky vesmírných letů, a proto je potřeba ho monitorovat. To je extrémně obtížné, protože kosmické záření tvoří mnoho primárních částic s velkým rozsahem energií a navíc závisí na řadě parametrů. Ve sluneční soustavě je tok kosmického záření např. silně ovlivňován jedenáctiletým slunečním cyklem, v blízkosti Země záleží dále na nadmořské výšce a síle magnetického pole Země v daném místě.

Za účelem zmonitorování prostorové distribuce dávky v blízkém okolí Země a její závislosti na výše uvedených parametrech bylo a je organizováno mnoho experimentů, řada z nich na Mezinárodní kosmické stanici (ISS). Jako příklad lze uvést DOSIS a na něj navazující DOSIS3D probíhající v evropském modulu Columbus, MATROSHKA-R probíhající v ruské části ISS, RAM probíhající v americké části ISS a PADLES probíhající v japonském Kibo modulu. Vzhledem k množství parametrů, na kterých jsou naměřena data závislá, a jejich časové proměnnosti musí být měření dlouhodobá (v řádu let). Výsledky z těchto experimentů pomohou mj. odhadnout rizika meziplanetárních letů (např. k Marsu) a jejich případnému snížení (např. startem letu z takové zeměpisné délky a šířky, že obdržená dávka od záření v blízkém okolí Země bude nejmenší).

K měření se využívají pasivní i aktivní detektory. U pasivní složky měření převládají termoluminiscenční detektory a detektory stop v pevné fázi. Termoluminiscenční detektory měří dávku obdrženou za celou dobu měření. Pomocí detektorů stop lze určit lineární přenos energie (*LET*) primárních i sekundárních částic, které mají *LET* větší než přibližně  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ , a tím je možné vytvořit *LET* spektrum pole záření v místě měření. Z *LET* částice je možné určit další veličiny.

Tato práce pojednává nejprve o kosmickém záření v blízkém okolí Země, tj. o jeho zdrojích a o faktorech, které ho ovlivňují. Druhá kapitola se zaměřuje na termoluminiscenční detektory a detektory stop. Je zde podrobně rozebrána podstata měření detektory stop a způsob jejich vyhodnocování. Třetí kapitola zmiňuje stručné informace

---

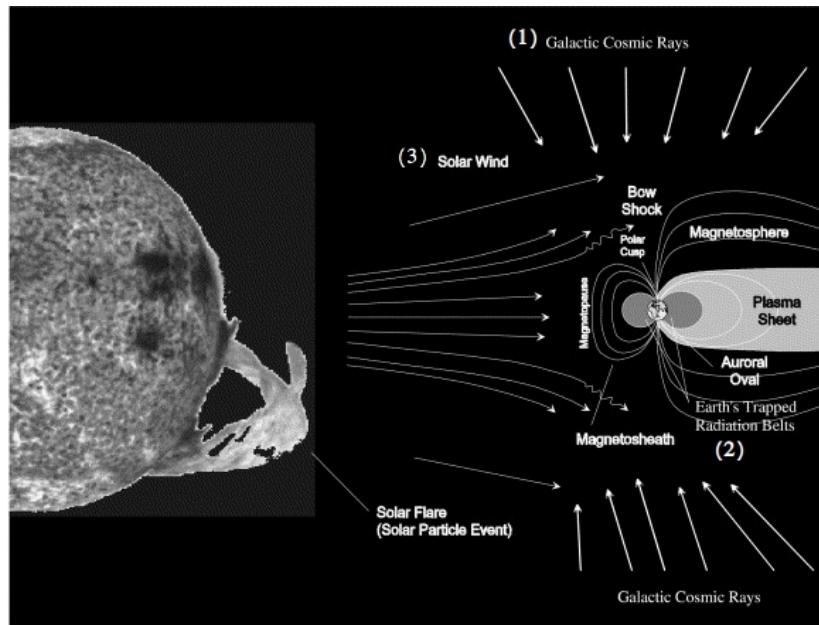
o Mezinárodní kosmické stanici. Ve čtvrté kapitole jsou podrobně popsány experimenty DOSIS a DOSIS3D, tzn. jejich průběh (s vývojem nadmořské výšky ISS a sluneční aktivity), používané detektory, jejich rozmístění. Dostupné výsledky byly srovnány z několika hledisek, např. pro různé časové úseky, různé umístění detektorů; také proběhlo porovnání s výsledky z jiných experimentů. V poslední praktické části byla na úvod nastíněna metodika vyhodnocování detektorů stop používaných Oddělením dozimetrie záření Ústavu jaderné fyziky AVČR, poté zde bylo rozebráno mnou provedené vyhodnocení několika detektorů stop.

# 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 (nadmořská výška přibližně v rozsahu 300–500 km [1]) 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 nabitých 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 nabitých částic emitovaných během vzácných, ale intenzivních slunečních erupcí (solar flares) nebo výronech koronální hmoty (CME, coronal mass ejections) [2]. Někdy se udávají jako čtvrtá složka albedo neutrony a protony. To 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 ovlivňují pole kosmického záření v blízkosti Země.



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. [2]

## 1.1 Zdroje kosmického záření v blízkém okolí Země

### 1.1.1 Galaktické kosmické záření

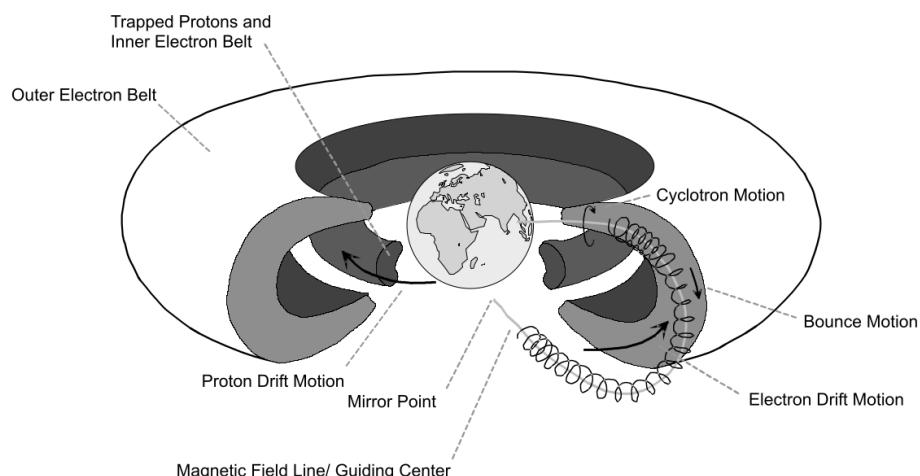
Galaktické kosmické záření se skládá z 98 % z protonů a těžších iontů (baryonová složka), z 2 % z elektronů a pozitronů (leptonová složka). V baryonové složce převládají protony (87%) a alfa částice (12%), zbytek tvoří ionty s protonovým číslem od 3 (Li) do 92 (U) [2]. Důležitou roli ve vesmírné dozimetrii hrají částice s vysokým atomovým číslem a velkou energií, protože jsou relativně 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 částice 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): jedním pohybem je rotace částic kolem geomagnetickým siločar nazývající se cyklotronový pohyb; částice se dále pohybují podél siločar zemského magnetického pole (u pólu mění směr), tento pohyb je způsoben nerovnoměrností zemského magnetického pole; jako poslední pohyb je udáván drift částic kolem Země (protony driftují na západ a elektrony na východ).



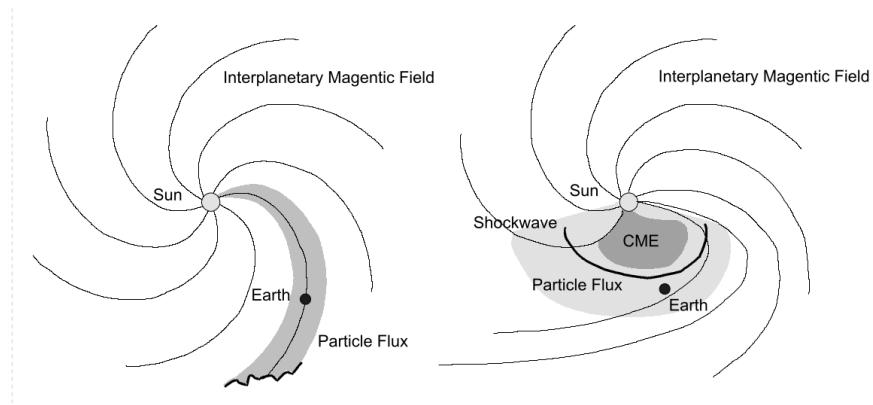
Obr. 1.2: Radiační pásy Země, nabité částice se pohybují třemi způsoby: cyklotronový pohyb, posuvný pohyb podél siločar a driftový pohyb kolem Země. [2]

Zachycené elektrony se nacházejí ve dvou vrstvách a vzhledem k jejich převážně nízké energii nepředstavují veliký zdravotní risk. 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. jihoatlantická 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 [2].

### 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, z toho jedna či dvě mohou být většího charakteru (fluence protonů je větší než  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ).

Na obrázku 1.3 vidíme rozdíl mezi sluneční erupcí a CME. Sluneční erupce je krátka žijící, obvykle v řádu hodin, a je charakteristická relativně velkými toky elektronů. Celková fluence je malá, mezi  $10^7$  a  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  a tyto události jsou omezeny na  $30^\circ$ - $40^\circ$  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  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  a může se šířit pod širokým úhlem solární délky, od  $60^\circ$  až do  $180^\circ$  [2].



Obr. 1.3: Dva typy SPEs: nalevo je sluneční erupce a napravo CME. [2]

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, které vzniká, když meziplanetární šoková vlna míjí Zem (v případě CME).

K významnějšímu zvýšení dávkového příkonu v blízkém okolí Země (respektive v kosmickém tělesu nacházejícímu se v něm) 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. Zde musí být příznivé podmínky magnetického pole Země, jinak je tok částic odkloněn pryč od sledovaného kosmického tělesa.

### **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 nalétavajícího projektilu; tato interakce nastává při srážce těžké nabité částice s terčíkem. V obou případech se produkuje jedna či více sekundárních částic, např. protony, neutrony,  $\alpha$  částice, těžká jádra; může také dojít ke vzniku většího štěpného fragmentu, který pak odnáší většinu kinetické energie [2].

## **1.2 Faktory ovlivňující kosmické záření v blízkém okolí Země**

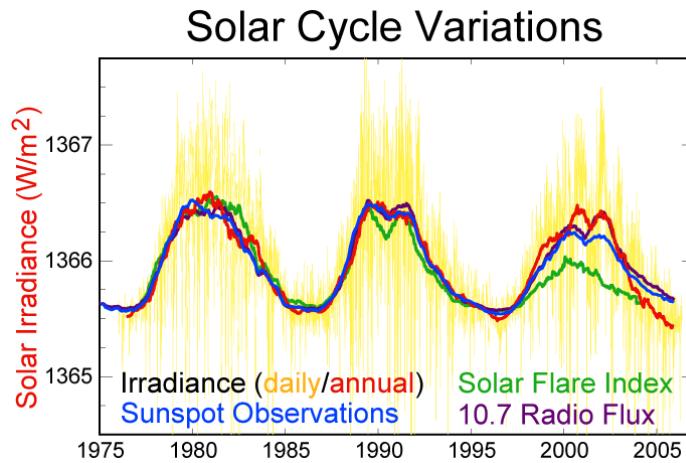
### **1.2.1 Fáze slunečního cyklu**

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 [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 sklonky oběžné dráhy (tedy takové, které zanášejí objekt blízko magnetickým polům) převládá složka galaktického kosmického záření, protože



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 [4].

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 sklonky oběžné dráhy (blízko rovníku) je největším zdrojem záření jihoatlantická anomálie, k tomu přispívá i geomagnetické pole, které 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 je navíc ovlivněna slunečním cyklem. Čím je atmosféra hustší, tím je záření více utlumeno (interakcemi s prvky atmosféry) [2]. Ozáření pocházející od GCR je na nadmořské výšce v podstatě nezávislé, pokud uvažujeme ozáření objektu nacházejícího se nad atmosférou [3].

### 1.2.4 Východní/západní anizotropie zachycených protonů

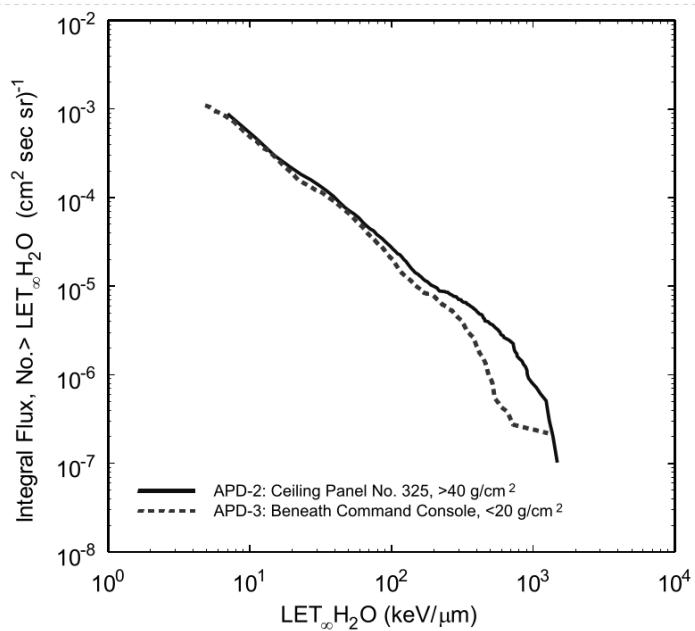
Tok protonů vstupujících do vesmírného objektu nad SAA je anizotropní: protony pohybující se na východ následují geomagnetické siločáry ležící nad oběžnou dráhou objektu, protony pohybující se na západ následují geomagnetické siločáry ležící pod

oběžnou dráhou objektu. Poloměr cyklotronového pohybu protonů v SAA je přímo úměrný atmosférickému měřítku výšky (atmospheric density scale height); tato veličina je definovaná jako vzdálost v nadmořské výšce, pro kterou se atmosférický tlak sníží o faktor e [5]. Ona úměrnost je způsobena tím, že protony cestující na západ se pohybují v hustší vrstvě atmosféry a tudíž s větší pravděpodobností interagují s atmosférou, a tím je toto záření utlumeno. Tento jev se projevuje až trojnásobným rozdílem dávkového příkonu mezi západní (do kterého narážejí protony cestující na východ) a východní (protony cestující na západ) částí objektu [2].

### 1.2.5 Stínění

Stínění vesmírného objektu představuje jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících 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. Vzrůst  $Q$  je dán zpomalením primárních částic ve stínění, které vede ke zvýšení jejich LET (Linear energy transfer, lineární přenos energie) [6].

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, kdy jeden detektor byl silně stíněn (více než  $40 \text{ g/cm}^2$ ) a druhý slabě (méně než  $20 \text{ g/cm}^2$ ). 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 [2]. 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 [2]. Plná čára zobrazuje spektrum silně stíněného detektoru, čárkovaná slabě stíněného detektora.

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 [2].

## 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 [2]. K měření ve vesmíru se ve velké míře používají i aktivní detektory, ale těmi se tato práce nezabývá.

K monitorování kosmického záření se používají hlavně termoluminiscenční detektory (TLD) a detektory stop v pevné fázi (TED, nuclear track etched detectors/solid state nuclear track detectors). V menší míře se využívají i detektory založené na opticky stimulované luminiscenci (OSLD), bublinkové detektory ... V této kapitole rozebereme TLD a TED.

Výstupem z TLD je dávka, která se absorbovala v detektoru za celý čas měření, avšak nejistí se kvalita záření (většinou). 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 celkovou dávku a dávkový ekvivalent [2].

### 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: při interakci ionizujícího záření s látkou detektoru dochází k ionizaci elektronů z valenčního pásu, čímž vznikají iontové páry (záporný elektron a kladná díra) a uvolněné 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). Elektronové pasti mohou být tvořeny stopovými příměsemi prvků (např. Mn, Dy, Tm, Cu, C, ...). Světelný signál je zesílen fotonásobičem a poté vyhodnocen.

Dodání energie pro vytržení elektronu z pasti nemusí být prováděno jen zahříváním látky, ale třeba i jejím osvícením. Tento jev je nazýván optická luminiscence a jsou na něm založeny OSLD.

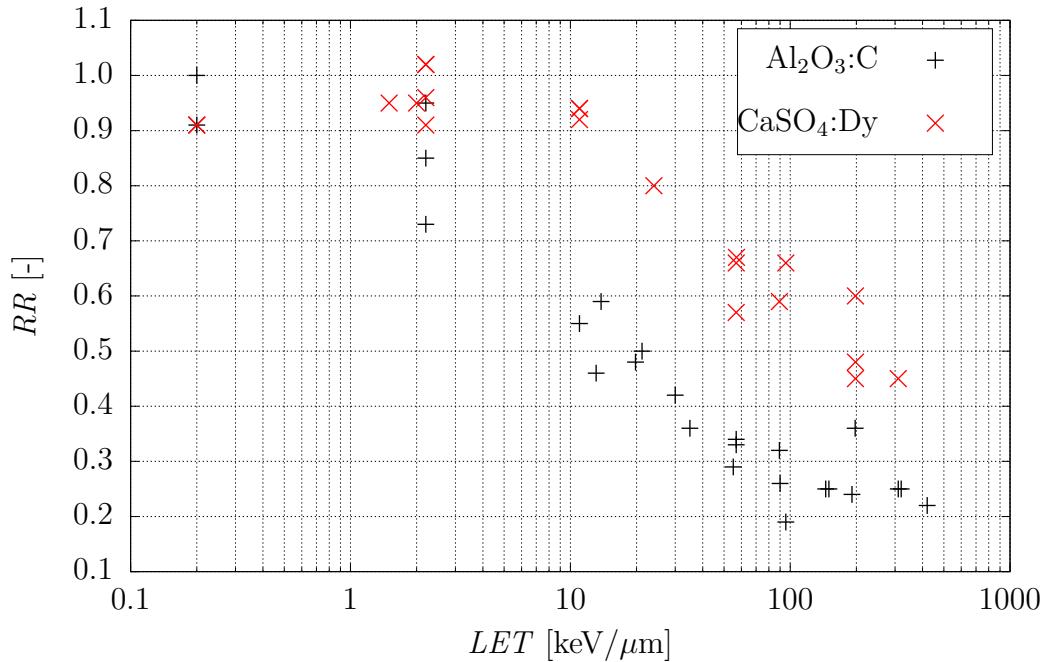
Pro vyhodnocení TL signálu je důležitým pojmem vyhřívací křivka TLD, což je závislost světelného toku (respektive elektrického signálu z fotonásobiče) na teplotě. Odezva TLD se určí právě z této křivky (např. jako plocha pod křivkou, plocha pod píkem, výška píku [3]) a na základě kalibrace ve známém zdroji lze určit absorbovanou dávku.

TLD měří spolehlivě částice s  $LET$  nižším než cca 10 keV/ $\mu$ m (tato hodnota se liší pro různé materiály), pro vyšší hodnoty  $LET$  se účinnost TLD snižuje [7]. 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 odezvy po ozáření stejnou dávkou v tkáni způsobenou částicemi  $Y$  a referenčním zářením  $\gamma$  [8].

Na vývoj  $RR$  se podíváme 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 [9]. 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 [8].



*Obr. 2.1: Relativní odezva dvou detektorů používaných NPI pro částice s různým LET. Data pocházejí z [9].*

## 2.2 Detektory stop v pevné fázi

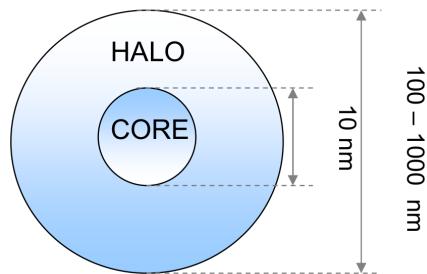
V některých pevných látkách vznikají při ozáření stabilní mikropoškození, tzv. latentní stopy, které mohou být vhodným způsobem zvětšeny. Následně lze zvětšené stopy spočítat např. pomocí mikroskopu, přičemž počet stop je úměrný počtu částic, které s materiálem interagovaly. Používají-li se tyto látky 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 [10]. Jako TED se používají hlavně plasty, skla a minerální krystaly.

TED jsou schopné měřit pouze částice s *LET* vyšším než je určitá prahová hodnota, jež je různá pro odlišné materiály. Pro plasty, které jsou nejcitlivější, se pohybuje kolem 10 keV/μm [11]. 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 [12].

Tvorba latentních stop není doposud plně pochopena. U anorganických materiálů se jej snaží vysvětlit např. mechanismus popsaný v [13]. 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 jádra 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 poloměru odpovídající dosahu delta elektronů, viz obr. 2.2. Poslední fáze představuje leptání, při němž jsou stopy zafixovány a zvětšeny. [14]



Obr. 2.2: Latentní stopa v organickém materiálu se skládá z jádra (CORE) a vnější oblasti (HALO). [14]

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 [11].

Nejpoužívanějším TED materiélem je poly allyl diglykolcarbonát, který bývá často také nazýván CR-39 (zkratka původního výrobního jména Columbia Resin #39 [15]). Jako detektor stop v pevné fázi se začal používat ke konci 70. let 20. století [14]; ve vesmírné dozimetrii byl poprvé použit při prvním letu amerických raketoplánů Space Shuttle v roce 1981 [2]. Původní CR-39 byl schopen detektovat částice s *LET* vyšším než cca 5  $\text{keV}/\mu\text{m}$  [2]. 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. [14]

### 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 [16]. 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

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

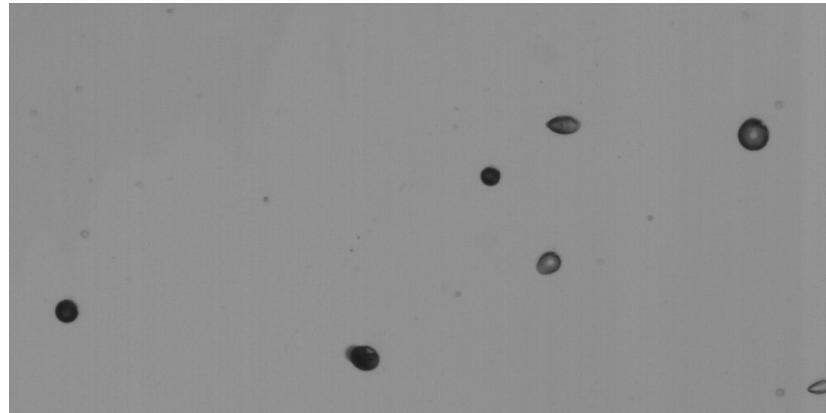
kde

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

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

a  $t$  je doba, po kterou se leptalo, tj.  $d = V_M t$  je tloušťka odleptané vrstvy nepoškozeného materiálu; vztahy byly převzaty z [16]. 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 [14].

Kalibrační křivka, neboli vztah mezi  $V$  a *LET*, je určena experimentálním ozařo-



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

váním příslušného TED. Pro proklad naměřených dat lze použít nejrůznější funkce, příkladem je polynom třetího stupně, který má výhodu jednoduchosti. Je důležité poznamenat, že od určitých hodnot  $LET$  nejsou k dispozici kalibrační body, a proto jsou za touto hranicí určené hodnoty  $LET$  zatížené velikou nepřesností.

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

Celkovou absorbovanou dávku  $D$  v mGy a dávkový ekvivalent  $H$  v mSv 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 ( $\text{v cm}^{-2}$ ) mající  $LET$  ( $\text{v keV}/\mu\text{m}$ ) 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 [14].

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

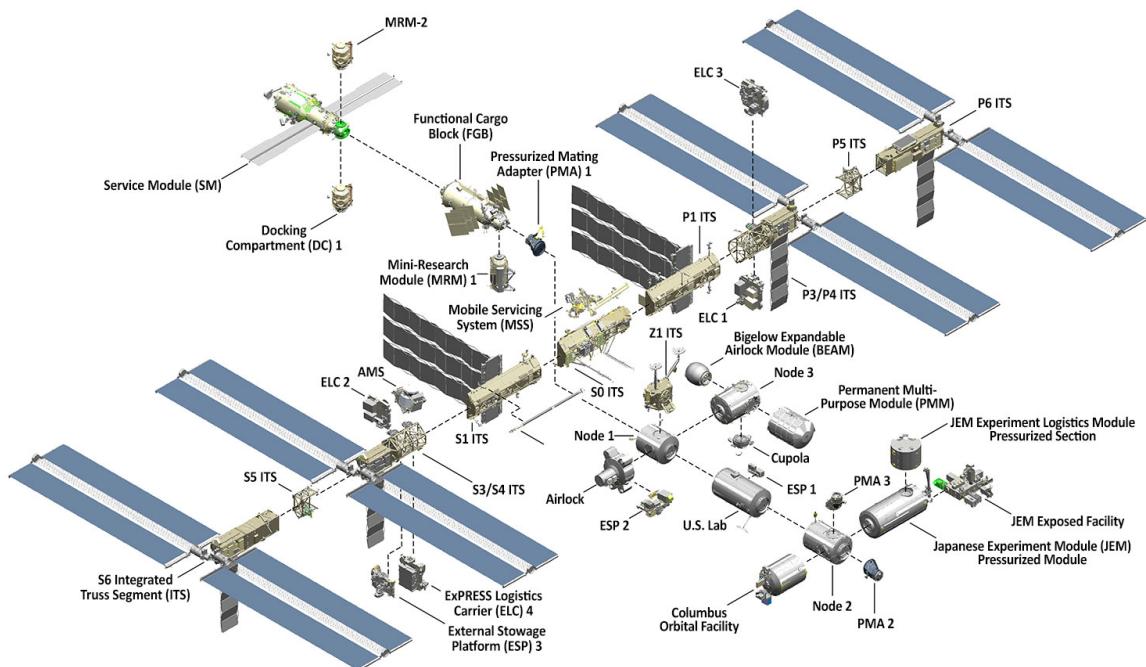
LET [keV/ $\mu\text{m}$ ]	$Q(\text{LET})$
$<10$	1
$[10; 100]$	$0,32\text{LET} - 2,2$
$>100$	$300/\sqrt{\text{LET}}$

## 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. [9]

### 3. Mezinárodní kosmická stanice

Mezinárodní kosmická stanice (ISS, International Space Station) je umělá družice Země. Obíhá Zemi na orbitě se sklonem dráhy  $51^\circ$  [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 [19]. 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 [20].

V tab. 3.1 jsou k dispozici základní parametry stanice.

*Tabulka 3.1: Základní parametry ISS [19].*

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 <sup>3</sup> (bez zahrnutí navštěvujících vozidel)
Objem pod tlakem	916 m <sup>3</sup> (s BEAM modulem 932 m <sup>3</sup> )
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) [21]; podle dohod s NASA má ESA nárok na 51% využití zdrojů modulu Columbus [17].

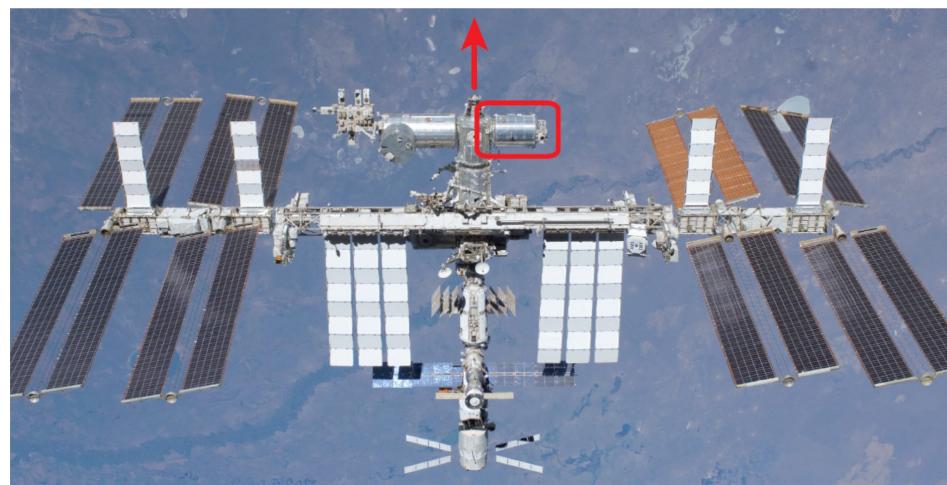
ISS bude provozována minimálně do roku 2024 [22] a celkové náklady na vybudování, provoz stanice do tohoto roku, výzkum atd. jsou odhadovány na 100 miliard eur, z nich cca 8 miliard je či bude hrazena ESA, resp. jejími 10 členskými zeměmi podílející se na programu (Belgie, Dánsko, Francie, Německo, Itálie, Nizozemí, Norsko, Španělsko, Švédsko and Švýcarsko) [23].

### 3.1 Modul Columbus

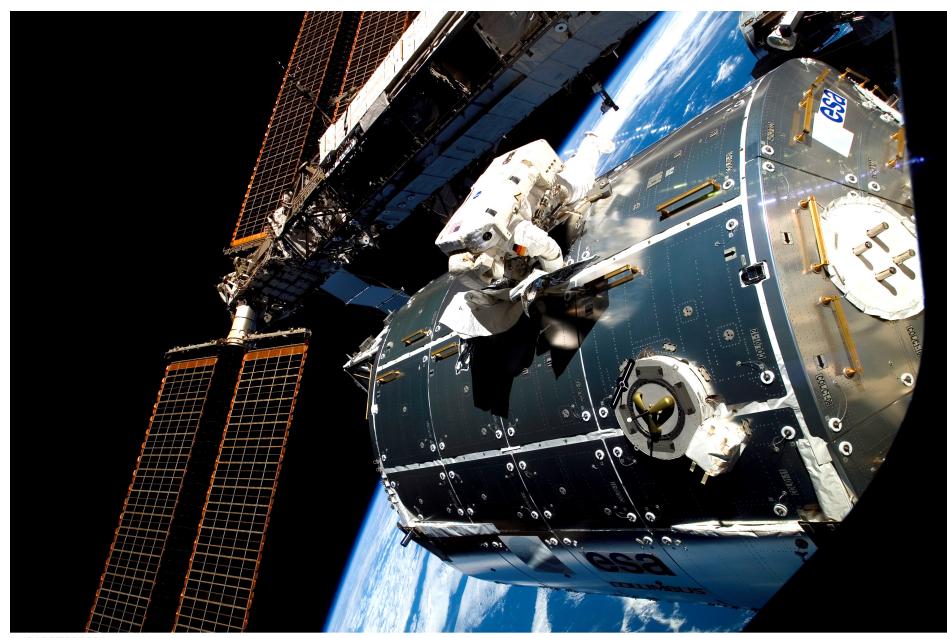
Modul Columbus je největším příspěvkem ESA k ISS.

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 [3].



Obr. 3.3: Modul Columbus ve srovnání s astronautem [25].

## 4. Experimenty DOSIS a DOSIS 3D

Informace v této kapitole byly čerpány převážně ze zdroje [3].

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. [3]*

---

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

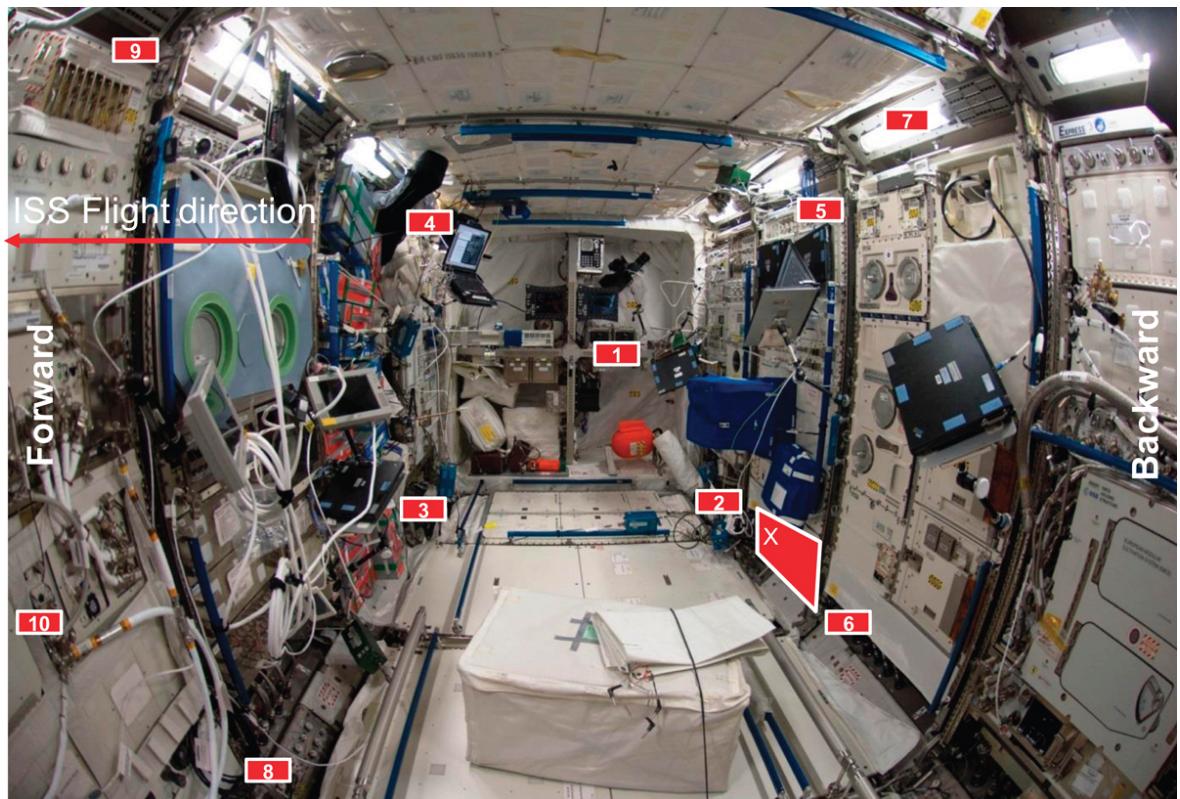
---

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 [3].



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. [3]

## 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 PDP. Tab. 4.2 obsahuje informace o obměně sad pasivních detektorů (dopravení na ISS, instalaci, doba expozice, 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.

*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 [3]. U sad 7,8,9 nejsou dosud k dispozici informace o nadmořské výšce. Na ISS se nyní (květen 2017) nachází 10. sada experimentu DOSIS3D.*

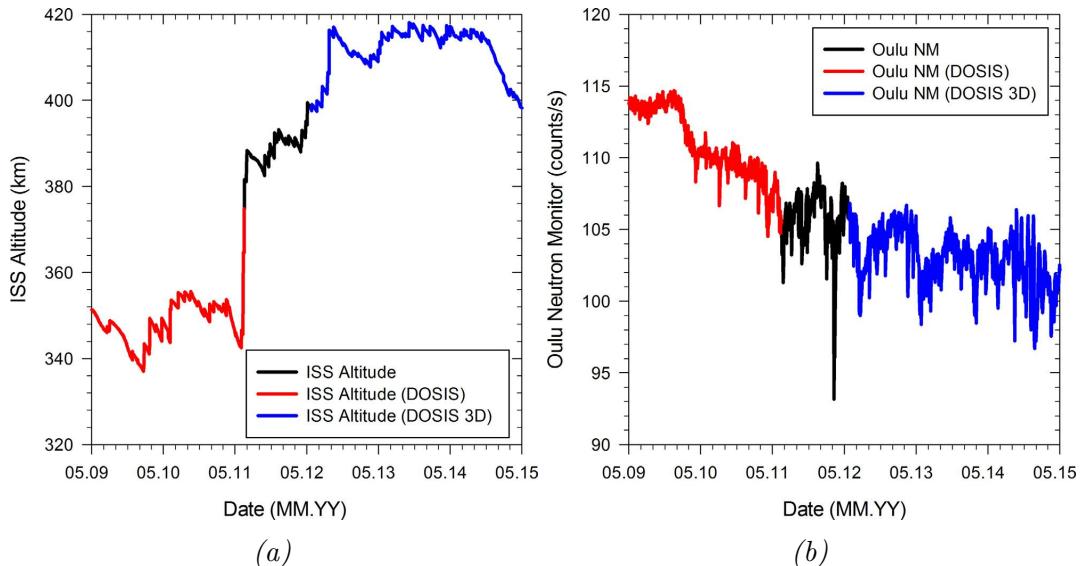
	Sada	Počátek-konec	Doba trvání [dny]	Pokrytí [%]	Nadmořská výška ISS [km]
DOSIS	1	Červenec 2009- Listopad 2009	136 (127)	93,3	339-348
	2	Listopad 2009- Květen 2010	191 (178)	93,2	337-349
DOSIS3D	1	Květen 2012- Září 2012	125 (113)	90,4	397-417
	2	Říjen 2012- Březen 2013	144 (137)	95,1	407-416
	3	Březen 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	

### 4.2.1 Vývoj nadmořské výšky a slunečního cyklu

Naměřené dávky a dávkové ekvivalenty jsou ovlivněny 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 od GCR 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. [3]

## 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 [26, 27].

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. 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 přede hřívá, 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. [3]

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

NPI používá dva TL detektory, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C a CaSO<sub>4</sub>:Dy. Oba dva jsou vyhodnocovány pomocí čtecího systému RA'94 (THORN EMI 9789 QB) nebo 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 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C), respektive 10 minut za 380 °C (CaSO<sub>4</sub>:Dy); oba dva rychle chladnou; kalibrování probíhá u obou pomocí <sup>137</sup>Cs; 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 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: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 lze pro používané OSL detektory dohledat v [3].

### 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 o tloušťce 1 mm, který byl původně využíván pouze MTA EK. Různorodost

využívaných TED a jejich způsobů vyhodnocení totiž komplikovalo vzájemné porovnávání a interpretaci naměřených dat [12]. TASTRAK, který je v tabulce u IPF, má tloušťku 0,7 mm. 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 o tloušťce 1 mm. [3]*

Institut	Výrobce/Jméno TED
DLR	ATP
MTA EK	TASTRAK (1 mm)
NPI	HARZLAS TD-1
IPF	TASTRAK (0,7 mm)
NIRS	HARZLAS TD-1 TechnoTrak
NASA/SRAG	ATP

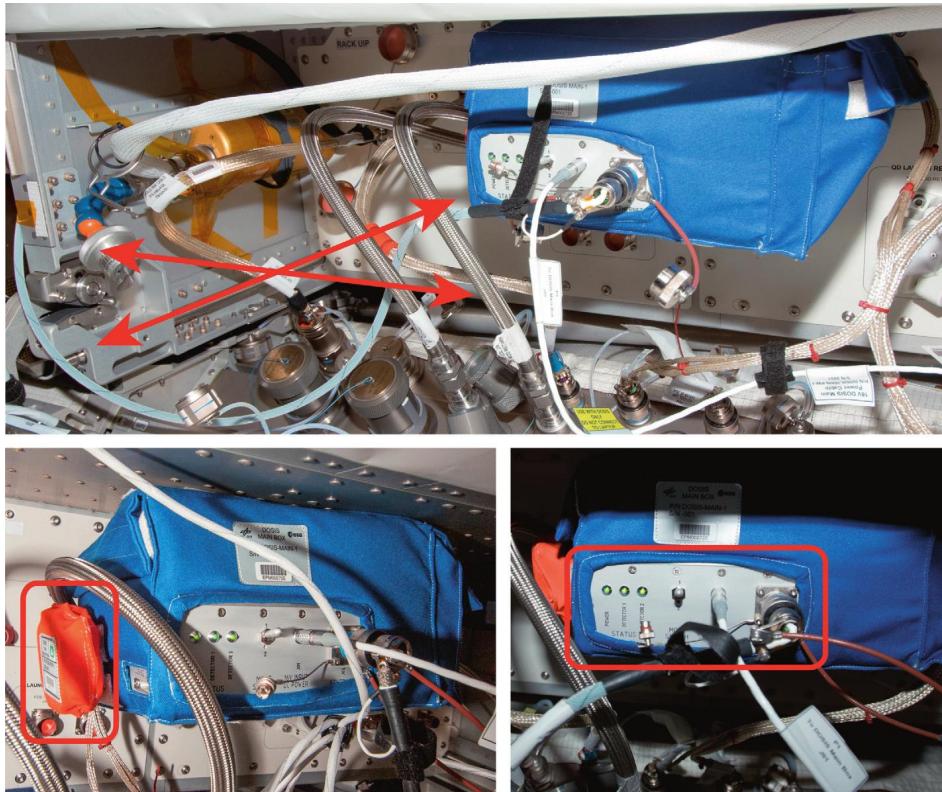
Metodika vyhodnocování TED používaných NPI je v oddíle 5.1.

#### 4.3.4 Aktivní detektory DOSTEL

Detektorová jednotka DOSTEL se skládá ze 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 impulzů a dávkový příkon, v druhém *LET* (při náhodném zaznamenání oběma detektory 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/ $\mu\text{m}$  [26].

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 umístění DOSTELu. Informace v tomto oddíle byly brány z [3, 26].



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. [27]

## 4.4 Data z luminiscenčních detektorů

Zde jsou uvedeny výsledky publikované v [3]. 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 získanými během jiných experimentů (popsaných ve článcích [1, 7, 11, 28, 29]).

### 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 materi-

álů:  ${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$ ;  ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ ;  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ ;  ${}^{\text{Nat}}\text{LiF:Mg,Ti}$ ;  ${}^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$ ;  ${}^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  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 odezv TLD materiálů s odezvou referenčního  ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ . Odezvou se myslí určená dávka z daného detektoru [3].*

Materiál	Poměr odezv
${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$	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

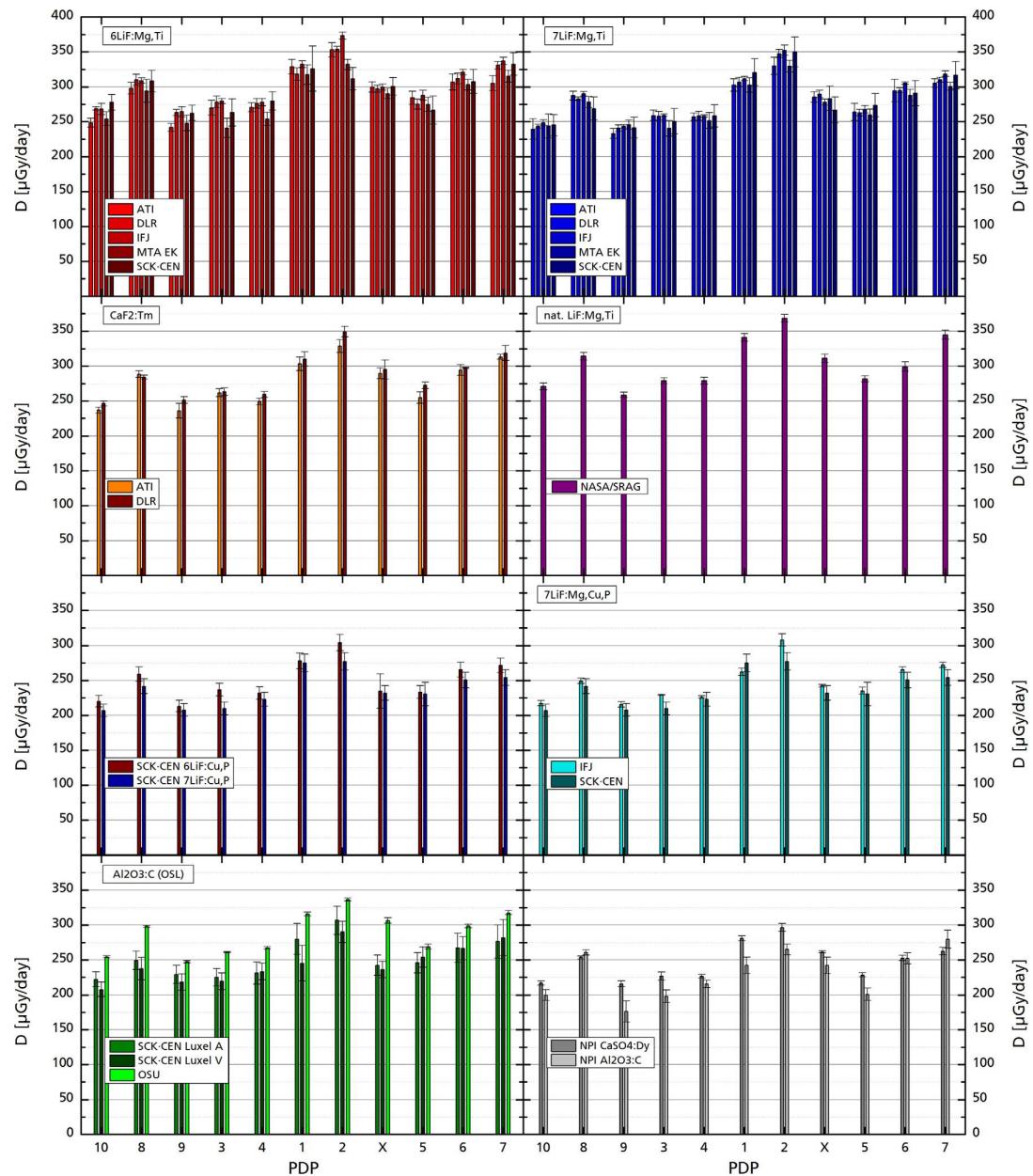
Dávkový příkon od  ${}^6\text{LiF:Mg,Ti}$ , respektive  ${}^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$  je systematicky vyšší než od  ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ , resp.  ${}^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$ , což je způsobeno tím, že nuklid  ${}^6\text{Li}$  má velký účinný průřez pro reakci  $(n, \alpha)$  s tepelnými neutrony. Nicméně rozdíl mezi těmito dvěma materiály není absorbovaná dávka pocházející od neutronů, ale tzv. gamma-equivalent neutron dose. To je dávka od záření  $\gamma$  takové velikosti, která vyvolá stejný termoluminiscenční signál jako skutečně obdržená dávka od neutronů, [3].

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 využitých metod.

#### 4.4.2 Srovnání dat z osmi sad pro jeden druh pasivního detektora

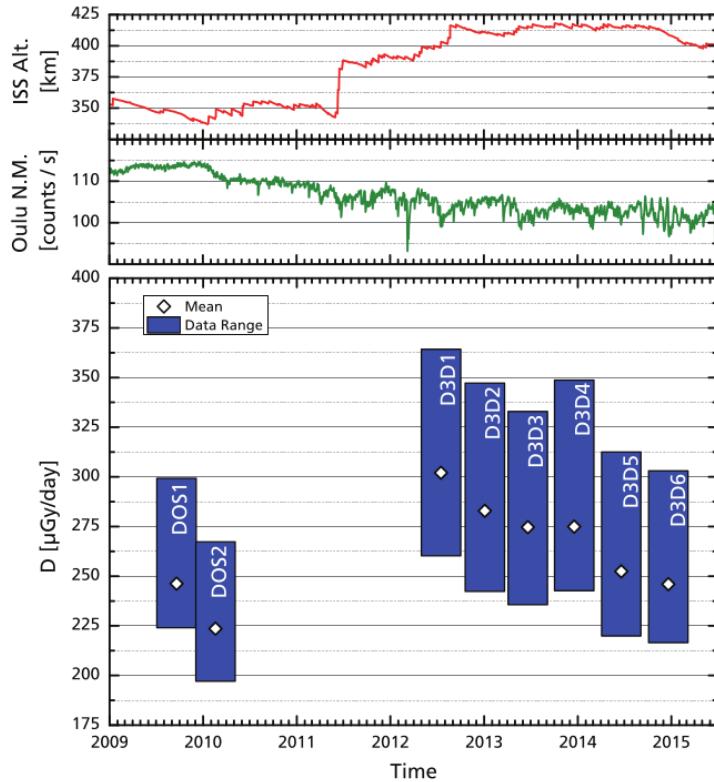
Srovnávala se data od TLD  ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$  ze všech PDP. Obr. 4.5 zobrazuje zprůměrovaný rozsah dávkových příkonů ze všech PDP; průměrování probíhalo pro každé PDP jednotlivě přes příkony určené několika organizacemi. Například pro D3D2 (druhá sada DOSIS3D) je interval naměřených dávkových příkonů přibližně [250, 350]  $\mu\text{Gy/den}$  (lze srovnat s obr. 4.4). Na ose  $x$  je čas v letech. Obrázek dále obsahuje v horní části



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) [3].

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.

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



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 [31], která souvisí se sluneční aktivitou [3].

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) [3]. 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 dávkové příkony 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/ $\mu\text{m}$  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 dávkových příkonů 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 [3].*

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

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

#### 4.4.4 Srovnání s jinými experimenty

Data z DOSIS a DOSIS3D je možné srovnat i s daty z jiných experimentů. Zde uvedeme srovnání s daty naměřenými v americké, ruské a japonské části ISS. Pro zvýraznění vlivu nadmořské výšky na měření je dále uvedeno i srovnání s daty, která byla naměřena v biologickém satelitu BION-M1 (ten se nacházel v danou dobu v jiné nadmořské výšce než ISS).

1. 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 ( $^7\text{LiF}:Mg,Ti$ ) a slouží ke stanovení prostorové distribuce dávky v ISS [32]. 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 rozpeřít 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. [3]

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 dohlednání např. v [33]) a v modulu Pirs ([34]); více o průběhu měření viz tab. 4.7. Detektory byly v obou případech umístěny v šesti tzv. SPD (sborka passivnych 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. [7]*

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

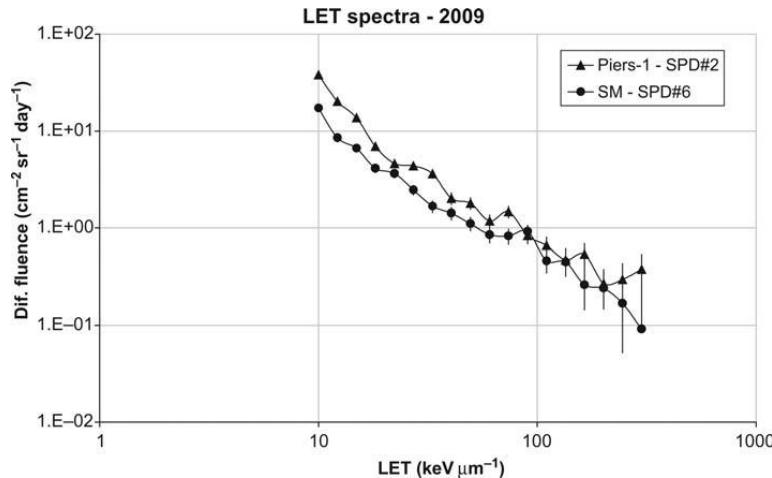
data od TLD Al-P z druhé fáze experimentu MATROSHKA-R (viz tab. 4.8) s daty od TLD  $^{7}\text{LiF:Mg,Ti}$  z první sady projektu DOSIS, která byla nainstalována v modulu Columbus od července 2009 do listopadu 2009 (dávkové příkony přibližně v rozmezí od 225 do 300  $\mu\text{Gy}/\text{den}$ , viz obr. 4.5). Dávkové příkony z modulu Pirs

*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. [7]*

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

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 tlouštce stínění [7]. Stínění mohlo hrát roli i v naměření mnohem nižší dávky v modulu Columbus, avšak vzhledem k rozdílné relativní účinnosti Al-P a  $^{7}\text{LiF:Mg,Ti}$  to nemůžeme tvrdit. Na obr. 4.6 jsou srovnána LET spektra z modulu Pirs (SPD 2)

a z modulu Zvezda (SPD 6); je zcela jasně 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 [7]. (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. [7]

3. Lepší srovnání poskytuje měření z roku 2012, které také proběhlo v rámci MATROSHKA-R. Bylo prováděno TL detektorem  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , který byl umístěn na šesti pozicích v ruské části ISS (jeden byl v modulu Pirs, jeden v ruském výzkumném modulu [35] 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). [11]
4. Článek [11] poskytuje i porovnání 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 CaSO<sub>4</sub>: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 mGy/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 stíněn) a stínění (vnitřek proti vnějšku satelitu BION-M1).

5. V japonském modulu Kibo [36] probíhá již od jeho připojení k ISS v roce 2008 měření pomocí TLD (prášek Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Tb) a TED (CR-39 materiály HARZLAS TD-1 a Fukuvi chemical) v rámci projektu PADLES (PAssive Dosimeters for Lifescience Experiments in Space). V letech 2008 až 2010 proběhly tři obměny detektorů (viz tab. 4.9). Detektory byly umístěny na dvanácti pozicích v Přetla-

*Tabulka 4.9: Obměna PADLES v modulu Kibo. [1]*

Fáze	Počátek-konec	Doba trvání [dny]	Nadmořská výška ISS [km]
1	Červen 2008-Březen 2009	278	339-359
2	Březen 2009-Srpen 2009	164	343-355
3	Září 2009-Duben 2010	214	337-350

kovém modulu, v případě třetí fáze navíc i na pěti pozicích v Logistickém modulu (přetlaková komora). Průměrný dávkový příkon naměřený TLD v první fázi je  $311 \pm 30 \mu\text{Gy}/\text{den}$ , v druhé fázi  $268 \pm 29 \mu\text{Gy}/\text{den}$ , v třetí fázi pro Přetlakový modul  $286 \pm 33 \mu\text{Gy}/\text{den}$  a pro Logistický modul  $289 \pm 27 \mu\text{Gy}/\text{den}$ . V době první fáze PADLES experiment DOSIS ještě neprobíhal. Druhá a třetí fáze PADLES odpovídá přibližně první a druhé sadě experimentu DOSIS (červenec 2009 až květen 2010). Rozsahy dávkových příkonů z <sup>7</sup>LiF:Mg,Ti z téhoto sad jsou přibližně [225; 300]  $\mu\text{Gy}/\text{den}$ , resp. [200; 265]  $\mu\text{Gy}/\text{den}$  (viz obr. 4.5). Vidíme, že data z modulů Kibo a Columbus jsou velmi podobná. To, že  $\dot{D}$  z druhé fáze na třetí fázi PADLES vzrostl, zatímco u DOSIS klesl, může být dán různým počátkem a koncem fází u PADLES a DOSIS. [1]

6. K monitorování dávkových příkonů v ISS se používá i Pille TLD systém. Tento systém byl využíván na každé kosmické stanice od druhé poloviny 70. let 20. století. Jedná se o TL detektor CaSO<sub>4</sub>:Dy (avšak v jiné formě než v jakou používá NPI) s

Tabulka 4.10: Rozsahy průměrných týdenních dávkových příkonů naměřených TLD systémem Pille v daný časový úsek [28, 29]. Za dvojitou svislou čárou jsou průměrné dávkové příkony od  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  pro  $i$ -tou sadu DOSIS3D, kde  $i =$ číslo řádku.

Časový úsek	Pille-Zvezda		DOSIS3D
		$\dot{D}$ [ $\mu\text{Gy/den}$ ]	$\dot{D}$ [ $\mu\text{Gy/den}$ ]
Květen 2012-Říjen 2012	[160; 200]		264
Listopad 2012-Duben 2013	[150; 210]		250
Květen 2013-Listopad 2013	[165; 190]		240
Listopad 2013-Květen 2014	[140; 180]		240
Květen 2014-Listopad 2014	[140; 170]		220
Listopad 2014-Březen 2015	[130; 160]		215

čtecím systémem, což umožňuje vyhodnocovat detektory přímo na orbitě. Na ISS se nachází v modulu Zvezda od roku 2003, kde se používá jako osobní dozimetru při CME, při výstupech do vesmíru a také pro mapování prostorové distribuce dávky. Detektory byly v roce 2009 obměněny a v současnosti se jich ve Zvezdě nachází dvanáct. Naměřené dávky neprošly korekcí na  $LET_{\text{H}_2\text{O}} > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  a nebyly převedeny na absorbované dávky ve vodě (resp. tkáňově ekvivalentním materiálu). V levé části tab. 4.10 jsou přibližné rozsahy průměrných týdenních dávkových příkonů naměřených v daný časový úsek. První časový úsek Pille odpovídá přibližně první sadě DOSIS3D, druhý úsek druhé sadě DOSIS3D a takto to pokračuje až k šestému úseku/šesté sadě. Pravá část tab. 4.10 obsahuje průměrné hodnoty dávkových příkonů od  $\text{CaSO}_4$  pro danou sadu; tyto dávkové příkony byly získány přenásobením průměrné hodnoty z  ${}^7\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$  (viz obr. 4.5) poměrem odezvy  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  a  ${}^7\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$  (viz tab. 4.5). Vidíme, že dávkové příkony od Pille jsou systematicky nižší. Částečně to bude dáno tím, že výsledky od Pille nejsou převedeny na absorbovanou dávku ve vodě. Dále pozorujeme, že  $\dot{D}$  od Pille sleduje podobný trend jako  $\dot{D}$  od DOSIS3D, tzn. pozvolné klesání. [28, 29]

**Shrnutí:** V první odrážce jsme srovnali  $\dot{D}$  z DOSIS&DOSIS3D s  $\dot{D}$  z americké části ISS (program RAM). Dávkové příkony z RAM měly stejnou minimální hodnotu jako dáv. příkony z modulu Columbus, ale maximální hodnotu měly vyšší. Také se zjistilo, že dávkové příkony se mohou lišit v jednom modulu v závislosti na lokálním stínění až dvojnásobně.

Ve druhé, třetí a šesté odrážce jsme data z DOSIS&DOSIS3D srovnávali s daty naměřenými v ruské části ISS, hlavně v modulu Zvezda. V druhé odrážce jsme zjistili, že

dávkové příkony byly vyšší ve Zvezdě, naopak v třetí a páté vyšly dávkové příkony vyšší v modulu Columbus. Příčinou jiného výsledku v druhé odrážce jsou pravděpodobně odlišné relativní účinnosti použitých TLD (experimentů diskutovaných v druhé odrážce).

V páté odrážce jsme porovnali dávkové příkony z modulu Columbus s dávkovými příkony v japonském modulu Kibo. Dávkové příkony vycházejí podobně.

Ve čtvrté odrážce proběhlo srovnání s dávkovými příkony naměřenými v satelitu BION-M1, který měl cca o 170 km větší nadmořskou výšku než ISS. To korelovalo s mnohem vyššími dávkovými příkony oproti  $\dot{D}$  z modulu Columbus. Dávkové příkony z povrchu pláště satelitu jsou více jak dvojnásobné ve srovnání s dávkovými příkony uvnitř satelitu.

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

## 5.1 Metodika

NPI používá materiál HARZLAS TD-1 (výrobce Nagase Landauer Ltd.) a od roku 2016 i TASTRAK (výrobce Track Analysis Systems Ltd.) [12]. HARZLAS TD-1 je leptán 18 hodin za teploty 70 °C v 5 N koncentrovaném roztoku NaOH; odleptaná vrstva je kolem 15,3  $\mu\text{m}$ . Velikost analyzované plochy se volí tak, aby bylo vyšetřeno alespoň tisíc stop (kvůli zajištění dostatečné statistiky). 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. Bud 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  $\mu\text{m}$ ; velikost analyzované plochy TASTRAKu se volí stejným kritériem jako u HARZLAS TD-1. Po leptání následuje u obou detektorů nasnímání stop lineárním snímacím zařízením s vysokým rozlišením (které je součástí mikroskopu HSP-1000, [37]), poté jsou snímky se stopami analyzovány programem HspFit.

Zatímco HARZLAS TD-1 detekuje částice s *LET* vyšším než 7 keV/ $\mu\text{m}$ , TASTRAK má detekční práh 20 keV/ $\mu\text{m}$  [12, 14]. 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 [12].

## 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.

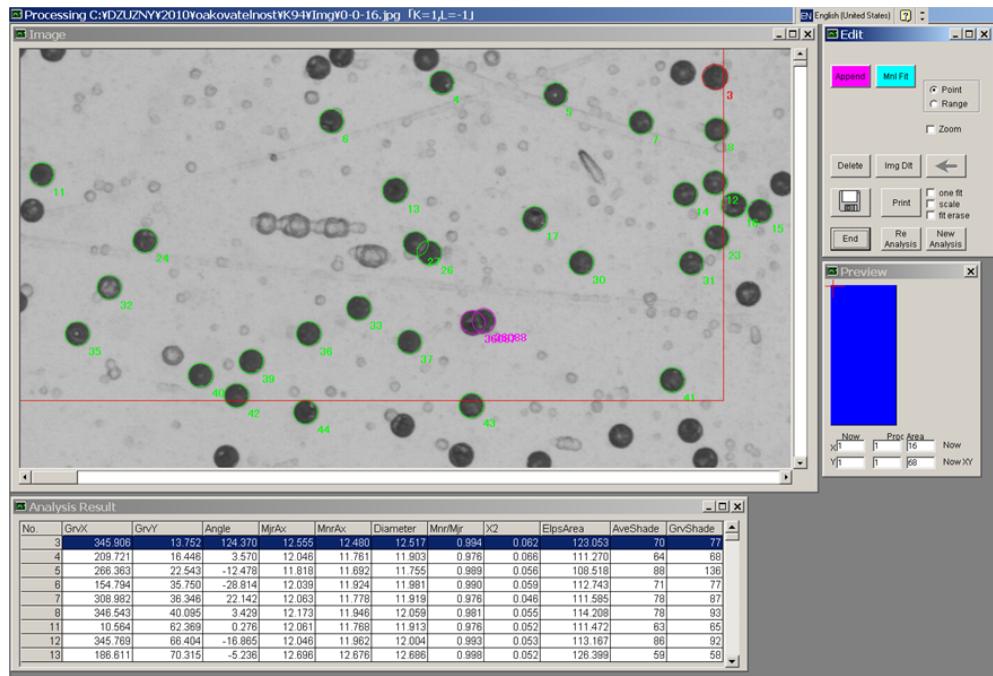
V obr. 5.3 jsou uvedeny jednotlivé snímky z povrchu náhodně vybraného detektoru. V (a) je snímek, který obsahuje čisté stopy; v (b) ukazuje červená šipka poškození materiálu nepocházející od ozáření ionizujícím zářením, které by mohl neznalý uživatel vyhodnotit jako vícero stop; v (c) taktéž ukazuje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

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, osách fitované elipsy, poměru leptacích rychlostí  $V$ , korekčním součiniteli  $k_\theta$ ,



Obr. 5.1: Vysoko rychlostní optický mikroskop HSP-1000. [37]

## KAPITOLA 5. VYHODNOCENÍ DETEKTORŮ STOP V PEVNÉ FÁZI (PRAKTICKÁ ČÁST)



Obr. 5.2: Okno programu HspFit; zeleně jsou označeny fity vygenerované počítačem a fialově fity vytvořené uživatelem. [37]

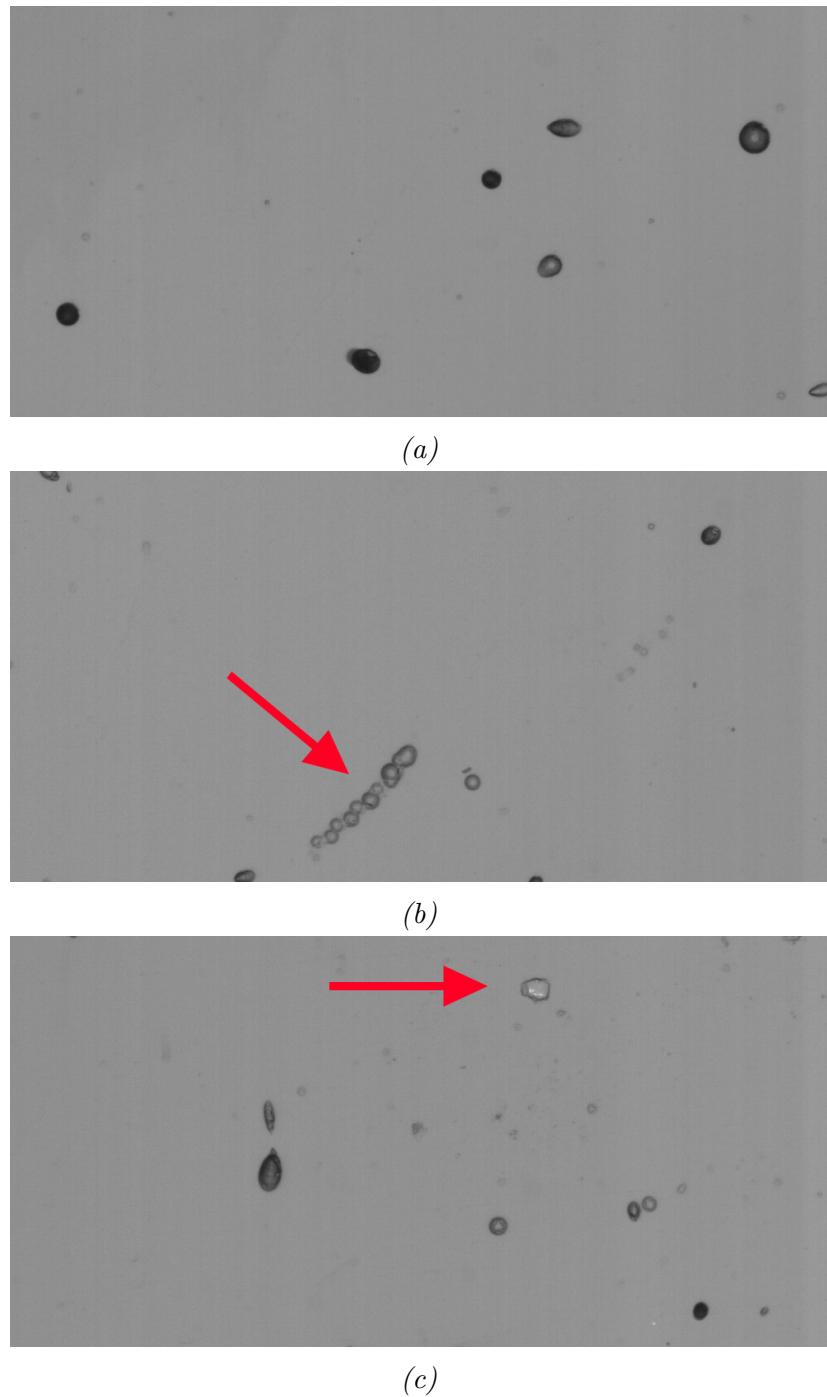
lineárním přenosu energie  $LET$ , dávce a dávkovém ekvivalentu každé stopy. Druhý soubor obsahuje celkovou dávku a dávkový ekvivalent, které se absorbovaly v detektoru i s jejich příkony. Třetí soubor obsahuje data potřebná k vytvoření diferenciálních  $LET$  spekter; z těchto dat jsem pomocí programu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

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

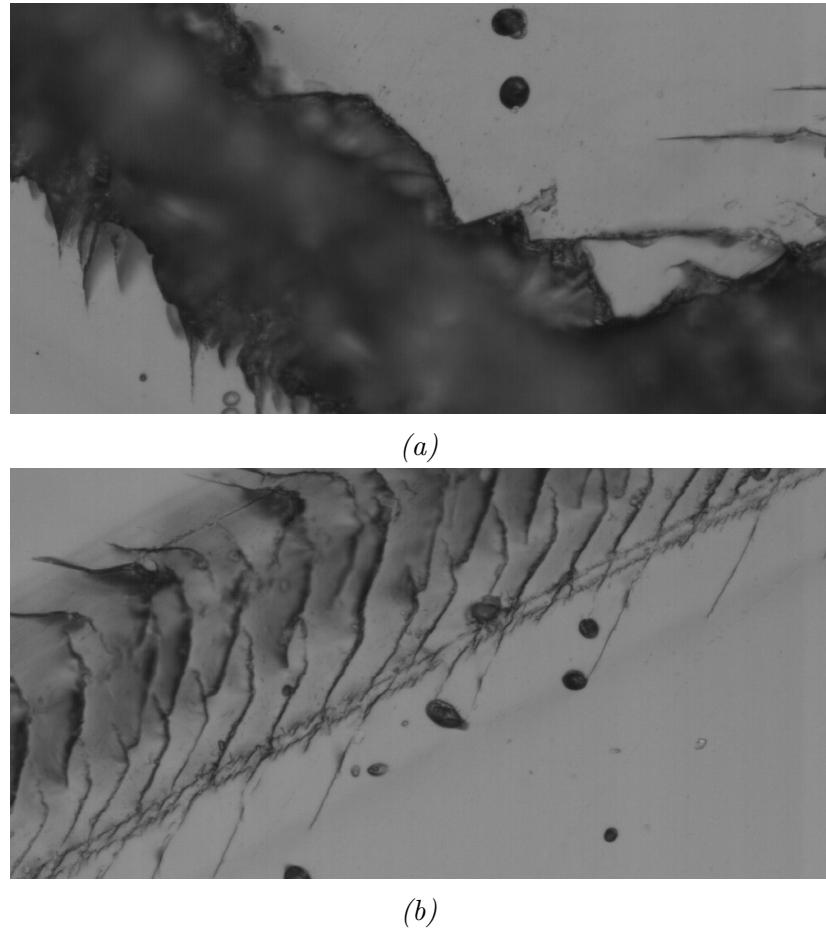
kde  $LET$  vychází v  $\text{keV}/\mu\text{m}$ ; závislost byla přebrána z [16]. Kalibrační křivka je také k nahlédnutí na obr. 5.5. Kvůli jejímu rozsahu byly z dalšího vyhodnocování vyloučeny stopy s  $LET > 1000 \text{ keV}/\mu\text{s}$ . Z  $LET$  všech častic jsou dále vypočítány dávka a dávkový 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 dopsat.

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



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 křížků představující referenční body.*

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

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

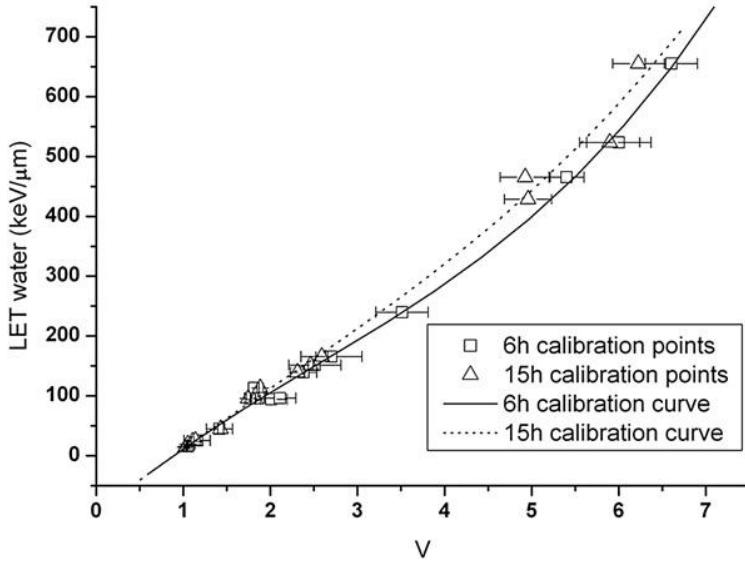
*Tabulka 5.2: Celkové dávky  $D$ , dávkové ekvivalenty  $H$  a příkony  $\dot{D}$ ,  $\dot{H}$  určené vyhodnocanými detektory (doba měření=180 dní).  $Q$  je průměrný jakostní faktor záření.*

PDP	$D$ [mGy]	$H$ [mSv]	$\dot{D}$ [ $\mu$ Gy/den]	$\dot{H}$ [ $\mu$ Sv/den]	$Q$ [-]
1	$5 \pm 1$	$90 \pm 20$	$30 \pm 6$	$500 \pm 100$	$17 \pm 5$
2	$5 \pm 1$	$90 \pm 20$	$28 \pm 6$	$500 \pm 100$	$18 \pm 5$
3	$4 \pm 1$	$80 \pm 20$	$24 \pm 5$	$400 \pm 100$	$17 \pm 5$

Tab. 5.2 obsahuje hledané celkové dávky  $D$  a dávkové ekvivalenty  $H$  i s jejich příkony (detektory byly umístěny na pozicích 180 dní); do vyhodnocení nebyly zahrnuty stopy s  $LET > 1000$  (kvůli rozsahu kalibrační křivky). Ze známosti  $D$  a  $H$  lze také určit kvalitu záření  $Q = H/D$ . Určení nepřesnosti je probráno dále v textu.

$$6\text{h: LET} = -99.8424 + 125.00172 V - 15.28166 V^2 + 2.04636 V^3, r^2 = 0.9961$$

$$15\text{h: LET} = -96.35071 + 114.90343 V - 7.77194 V^2 + 1.27248 V^3, r^2 = 0.9926$$



Obr. 5.5: Kalibrační křivky pro TASTRAK leptaný 6, resp. 15 hodin. Obrázek obsahuje i kalibrační body. Kalibrační křivky pocházejí od MTA EK, [16].

Na obrázcích 5.6, 5.7, 5.8 a 5.9 jsou mnou vytvořená diferenciální *LET* spektra pro různé veličiny; *LET* intervaly byly zvoleny tak, aby byly na logaritmické ose ekvidistantní. První spektrum zobrazuje počet stop (detekovaných částic) spadnulých do jednotlivých *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  $\Phi$  částic s *LET* v daném intervalu;  $\Phi$  je definována vztahem

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

kde  $dN$  je počet částic, které dopadly na kouli s příčným řezem o obsahu  $dA$  pod prostorovým úhlem  $d\Omega$ . K výpočtu  $\Phi_i$  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 [16].

*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 [38].

Nechť  $\Delta n$  je počet částic v jednom z *LET* intervalů. Lze uvažovat model [38], kdy nepřesnost určení  $\Delta n$  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

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

který je pro zjednodušení uveden pro funkci  $f$  závislou pouze na dvou veličinách  $x, y$ , obecně jich může být více;  $u(x), u(y)$  jsou chyby veličin  $x, y$ ;  $u(x, y)$  je jejich kovariance.

Tedy pro  $u_2$

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

kde  $\Delta LET$  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 [38].

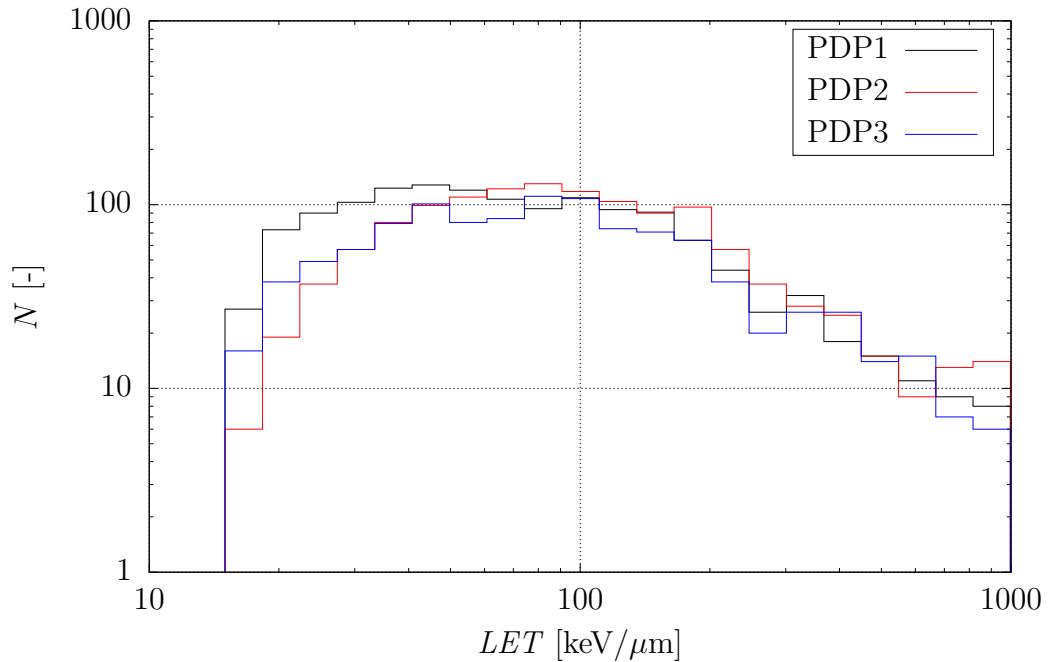
Třetí složka nejistot  $u_3$  se dá určit jen v některých situacích, viz [38].

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

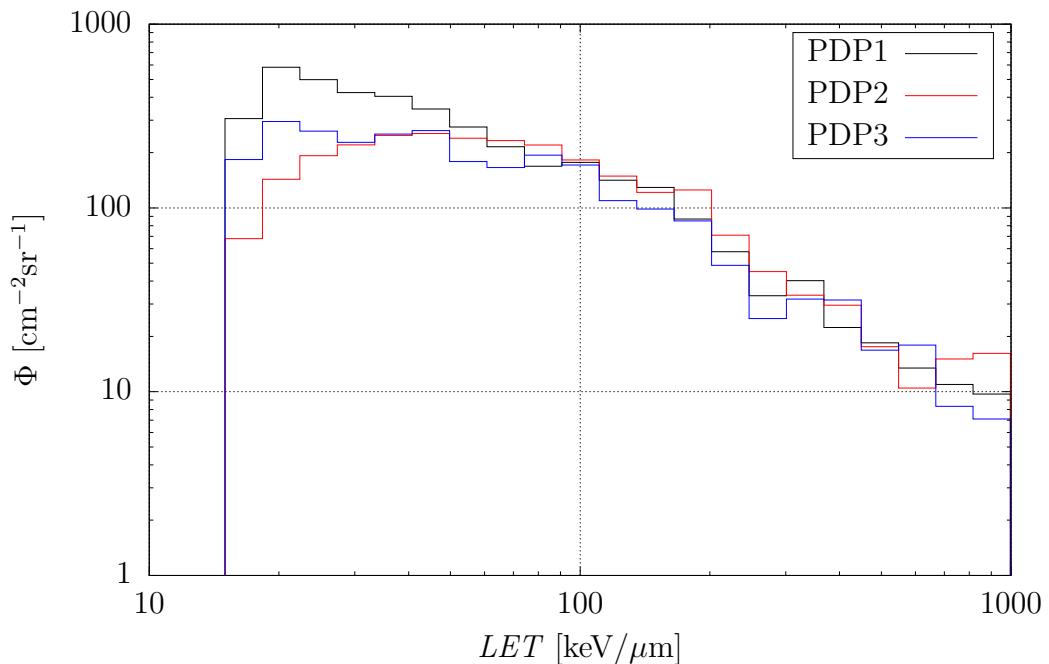
$$u(D_i) = \sqrt{ \left( \frac{\partial D_i}{\partial LET_i} u(LET_i) \right)^2 + \left( \frac{\partial D_i}{\partial N_i} u(N_i) \right)^2 }, \quad (5.6)$$

kde vzhledem k Poissonovu rozdělení náhodné veličiny  $N_i$  je  $u(N_i) = \sqrt{N_i}$ , [14];  $u(LET_i)$  se určí způsobem popsaným výše. Nepřesnost dávkového ekvivalentu se zjistí obdobně.

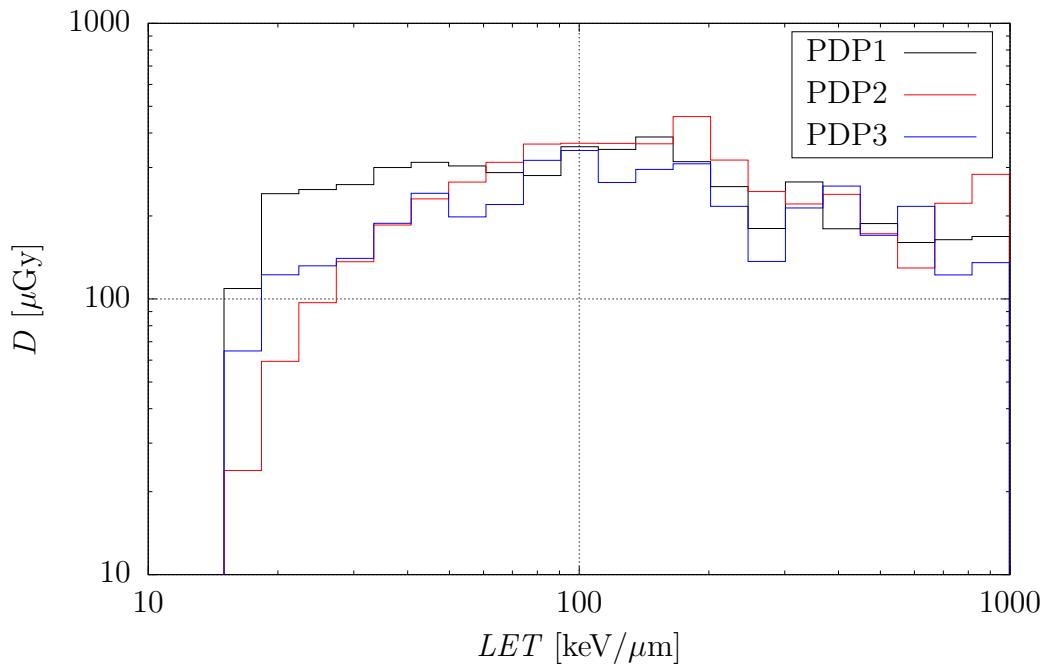
Do *LET* spekter jsem nepřesnosti nezahrnul. Relativní chyba  $D$  a  $H$  je zhruba 20 % [38].



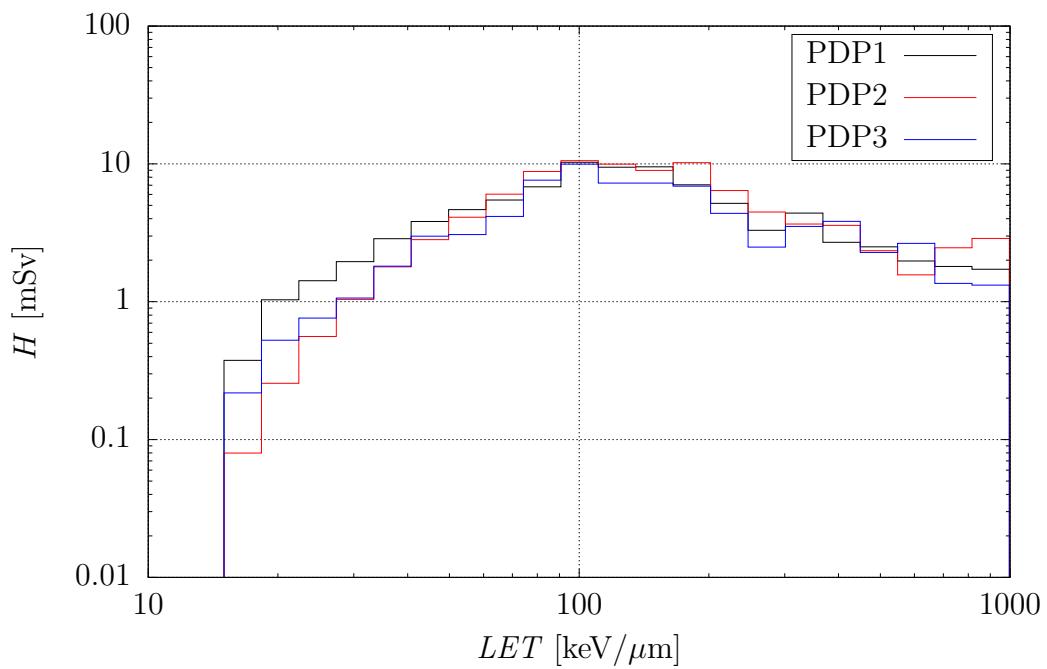
*Obr. 5.6: LET spektra vyhodnocených detektorů, na vertikální ose je počet stop v intervalu.*



*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

Ze spekter vidíme, že byly registrovány částice s  $LET \in [15; 1000]$  keV/ $\mu$ m; dolní hranice je dána detekčním prahem TASTRAKu a horní hranice byla uměle nastavena s přihlédnutím k rozsahu kalibrační křivky. Nejpočetnější složku tvoří dle spektra 5.6 stopy s  $LET$  v rozsahu 30 až 200 keV/ $\mu$ m. Ty odpovídají nejspíš protonům, které pocházejí z SAA nebo z interakcí neutronů s materiélem detektoru, a  $\alpha$  částicím. Protony mají v CR-39 maximální  $LET$  kolem 80-90 keV/ $\mu$ m,  $\alpha$  částice kolem 200 keV/ $\mu$ m [39]. Stopy s nižším  $LET$  odpovídají iontům z primárního kosmického záření, stopy s vyšším  $LET$  odraženým jádrům O, C atd. Ze stejného spektra je také vidět, že bylo detekováno relativně málo částic s malým  $LET$  (mezi 20 a 30 keV/ $\mu$ m). To je způsobeno kratší dobou leptání detektorů, po které nebyla většina stop s malým  $LET$  ještě odhalena.

Na obr. 5.6 a v tab. 5.1 je vidět, že v prvním detektoru bylo analyzováno nejvíce stop a že tento nadbytek oproti ostatním detektorům tvoří stopy s nižším  $LET$ . Toto může být způsobeno tím, že jsem při ručním analyzování stop prvního detektoru připustil do dalších výpočtů i tzv. přeleptané stopy. To jsou stopy od částic s krátkým dosahem (sekundárních částic), pro které byla doba leptání příliš dlouhá, takže započalo jejich odstraňování, ale ne tak ne tak dlouhá, aby byly odstraněny úplně. Přeleptané stopy neposkytují žádnou relevantní informaci.

Spektra pro dávku a dávkový příkon názorně ukazují rozdíl mezi těmito dvěma veličinami. Tab. 5.3 zobrazuje relativní příspěvky k  $D$  a  $H$  od částic s různým  $LET$ .

*Tabulka 5.3: Relativní příspěvky zaokrouhlené na jednotky k celkové dávce  $D$ , resp. k celkovému dávkovému ekvivalentu  $H$  od částic z daného  $LET$  intervalu.*

$LET$ [keV/ $\mu$ m]	$D_{\text{rel}}$ [-]	$H_{\text{rel}}$ [-]
[22; 33]	9 %	3 %
[110; 200]	20 %	28 %
[546; 812]	8 %	5 %

Dávkové příkony určené z vyhodnocených TED (tab. 5.2) jsou mnohem menší než dávkové příkony určené z TLD (viz. oddíl 4.4; lze předpokládat, že  $\dot{D}$  z osmé sady budou vycházet alespoň řádově jako  $\dot{D}$  v předchozích sadách). Je to tím, že převážná část absorbované dávky pochází od částic s  $LET$  menším než je detekční prah TASTRAKu. Podobné rozdíly mezi dávkovými příkony od TLD a TED byly naměřeny i v jiných experimentech, např. [7, 11, 1].

Velikost dávkového příkonu vyhodnoceného detektoru z PDP3 je menší než velikost

## KAPITOLA 5. VYHODNOCENÍ DETEKTORŮ STOP V PEVNÉ FÁZI (PRAKTIČKÁ ČÁST)

dávkových příkonů z vyhodnocených detektorů z PDP1,2. Tento rozdíl lze pozorovat i u dávkových příkonů z luminiscenčních detektorů (obr. 4.4). Vyšší dávkový příkon z PDP1 než z PDP2 v případě vyhodnocených detektorů je dán vyšším počtem analyzovaných stop prvního detektoru (viz dva odstavce výše).

Vyhodnocování bude pokračovat druhým leptáním, při kterém se zobrazí částice s menším *LET* delším dosahem. Bude leptána stejná plocha a díky referenčním bodům (obr. 5.4) bude možné rozlišit jednotlivé stopy od sekundárních a primárních částic. Stopy od sekundárních částic, které byly zřetelné po prvním leptání, budou nyní odleptány, případně přeleptány, a naopak se zobrazí předtím neviděné stopy od primárních částic, které mají dlouhý dosah. Vypočtou se dávky a dávkové ekvivalenty nových stop a poté se připočtou k *D* a *H* určené už při prvním leptání. Nakonec se kombinací dat z TLD a TED postupem popsaným v oddíle 2.3 určí celkové dávkové příkony a dávkové ekvivalenty.

# Závěr

V této práci byla probrána problematika kosmického záření v blízkém okolí Země a jeho monitorování. Bylo pojednáno o pasivních detektorech, které se využívají k jeho detekci. Stručně jsem zmínil jejich způsob fungování a podrobně jsem rozepsal metodiku vyhodnocování detektorů používaných Oddělením dozimetrie záření Ústavu jaderné fyziky AVČR. Ve stěžejní části byly popsány experimenty DOSIS a DOSIS3D, které se zabývají stanovením prostorové distribuce dávky v ISS modulu Columbus. Jejich výsledky byly konfrontovány s daty jiných, podobných experimentů. Nakonec jsem vyhodnotil tři detektory stop TASTRAK, které byly umístěny od prosince 2015 do června 2016 v rámci experimentu DOSIS3D v modulu Columbus. K tomuto účelu jsem napsal skript v programovacím jazyce Python. Vyhodnocování detektorů jsem důsledně popsalo. Výsledkem je vypočítaná celková absorbovaná dávka a dávkový ekvivalent (resp. příslušné příkony) z každého detektoru. Pro každý detektor jsem dále vytvořil čtyři *LET* spektra – pro počet detekovaných částic, pro diferenciální fluenci, pro dávku a pro dávkový ekvivalent. Dávkové příkony prvního, druhého a třetího detektoru jsou  $D_1 = (30 \pm 6) \mu\text{Gy}/\text{den}$ ,  $D_2 = (28 \pm 6) \mu\text{Gy}/\text{den}$  a  $D_3 = (25 \pm 5) \mu\text{Gy}/\text{den}$ . Příkony dávk. ekvivalentů z odpovídajících detektorů jsou  $H_1 = (500 \pm 100) \mu\text{Sv}/\text{den}$ ,  $H_2 = (500 \pm 100) \mu\text{Sv}/\text{den}$ ,  $H_3 = (400 \pm 100) \mu\text{Sv}/\text{den}$ . Dávkové příkony z termolumiscenčních detektorů vycházejí zhruba o jeden řád vyšší. Tento rozdíl je dán necitlivostí vyhodnocených detektorů stop vůči částicím s  $LET < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ , nižší účinností TLD vůči částicím s vyšším  $LET$  a také tím, že vyhodnocené detektory stop byly leptány pouze jednou, tj. byly zobrazeny pouze některé stopy. Kosmické záření je hlavně tvořeno protony (malé  $LET$ ), nicméně částice s velkým  $LET$  přispívají k  $H$  nezanedbatelně (podobně nebo více jak nízké částice). *LET* spektra jsou k vidění v předchozí kapitole.

V budoucnu lze detektory stop leptat podruhé, čímž se zobrazí další stopy. Vypočte se opět dávka, dávk. ekvivalent, a poté se přičtou k výsledkům prvního leptání. Kompletní výsledky z detektorů stop se dále zkombinují s výsledky z TLD, a tak se určí celková

## *KAPITOLA 5. VYHODNOCENÍ DETEKTORŮ STOP V PEVNÉ FÁZI (PRAKTIČKÁ ČÁST)*

---

absorbovaná dávka a dávk. ekvivalent.

Dosavadní výsledky experimentů DOSIS a DOSIS3D poukazují na nutnost dlouhodobého souvislého měření kosmického záření v blízkém okolí Země, mají-li být prozkoumány všechny vlivy na jeho tok daným místem a na velikost obdržených dávek v daném místě.

Cílem této práce bylo udělat rešerši na problematiku kosmického záření v blízkém okolí Země a jeho monitorování pasivními detektory, seznámit se podrobně s probíhajícími experimenty zkoumající kosmické záření v blízkosti Země (hlavně s DOSIS a DOSIS3D), obeznámit se s metodikou a vyhodnocováním detektorů stop, analyzovat několik detektorů. Všeho bylo dosaženo.

# Seznam literatury

1. NAGAMATSU, A.; MURAKAMI, K.; KITAO, K.; SHIMADA, K.; KUMAGAI, H.; TAWARA, H. Area radiation monitoring on ISS Increments 17 to 22 using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo. *Radiation Measurements*. 2013, roč. 59, s. 84–93. ISSN 1350-4487.  
Dostupné z DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.05.008>.
2. 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.
3. 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>.
4. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Solar Cycle* [online]. 2017 [cit. 2017-06-11].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle).
5. 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](https://en.wikipedia.org/wiki/Scale_height#Scale_height_used_in_a_simple_atmospheric_pressure_model).
6. 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>.
7. 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.
8. 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).
9. 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>.
10. 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).
11. 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>.
12. 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.

13. 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).
14. 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.
15. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *CR-39* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25].  
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/CR-39>.
16. 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.
17. 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%ADrn%C3%A1\\_stanice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mezin%C3%A1rodn%C3%AD_vesm%C3%ADrn%C3%A1_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](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/Where_is_the_International_Space_Station).
19. GARCIA, Mark. *Station Facts and Figures* [online]. 2016 [cit. 2017-04-17].  
Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures>.
20. 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>.
21. 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](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/About_the_International_Space_Station).
22. 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>.

23. 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](http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/How_much_does_it_cost).
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](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/columbus.html).
25. 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](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).
26. 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).
27. 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).
28. HIRN, A. *Pille Measurements on ISS (May 2013 – March 2014)* [online].  
2015 [cit. 2017-06-23].  
Dostupné z: <http://wrmiss.org/workshops/nineteenth/Hirn.pdf>.
29. HIRN, A. *Pille Measurements on ISS (May 2014 – March 2015)* [online].  
2016 [cit. 2017-06-23].  
Dostupné z: [http://wrmiss.org/workshops/twentieth/Hirn\\_Pille.pdf](http://wrmiss.org/workshops/twentieth/Hirn_Pille.pdf).
30. PÁLFALVI, J.K. *Passive dosimetry in the Service (Zvezda) module: 2010-2014*. [online].  
2015 [cit. 2017-06-23].  
Dostupné z: <http://wrmiss.org/workshops/nineteenth/Palfalvi.pdf>.
31. USOSKIN, Ilya. *Cosmic Ray Station of the University of Oulu* [online].  
[Cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://cosmicrays.oulu.fi>.

32. 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](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/236.html).
33. NASA. *Russian Service Module* [online]. 2015 [cit. 2017-06-19]. Dostupné z:  
[https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_417.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_417.html).
34. 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)).
35. WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. *Russian Research Module* [online].  
2016 [cit. 2017-06-20].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Russian\\_Research\\_Module](https://en.wikipedia.org/wiki/Russian_Research_Module).
36. JAXA. *Japanese Experiment Module (KIBO)* [online]. 2014 [cit. 2017-06-24].  
Dostupné z: <http://iss.jaxa.jp/en/kibo/>.
37. AVČR, ODZ ÚJF. *Mikroskop HSP-1000* [online]. [Cit. 2017-05-13]. Dostupné z:  
<http://cesky.odz.ujf.cas.cz/home/vybaveni/mikroskop-hsp-1000>.
38. 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>.
39. ZIEGLER, James F. *SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter* [online].  
[Cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.srim.org/>.

# A. Python skript pro vyhodnocování stop

```
1 from math import *
2 import sys
3 import numpy
4
5 ELV2J = 0.000001602
6
7 zp_pouz = "Zpusob pouziti: python vypocet_L.py jmeno_souboru hodnota_B
-> "
8
9 if (len(sys.argv) < 3):
10     print "Malo parameteru na prikazove radce!"
11     print zp_pouz
12     sys.exit(1)
13
14 fileName = sys.argv[1]
15 B = float(sys.argv[2])
16
17 # otevreni souboru pro vstup a vystup
18 inFile = file(fileName,'r') #vstupni soubor
19 outFile = file(fileName+'.results','w') #soubor pro vypis vsech
-> spoctenych hodnot
20 histFile = file(fileName+'.histogram','w') #soubor pro vypis hodnot do
-> histogramu
21 davkaFile = file(fileName+'.davky','w') # soubor pro zapsani celkovych
-> davek a davkovych ekvivalentu
22
23 # citac vynechanych radku
24 inData = 0
25
26 # promenne pro uchovani
27 L_list = []
28 D_list = []
29 H_list = []
30 V_list = []
31
32 outFile.write('#;X;Y;A;B;V;k;L;D;H\n')
33
34 for str_line in inFile:
35     if (inData == 2):
36         data = str_line[:-1].split(',')
37         V = sqrt(1+4*pow(float(data[4])/B,2)/pow(1-pow(float(data[5])/
-> B,2),2))
38         L = -99.8424+125.00172*V-15.28166*(V*V)+2.04636*(V*V*V)
```

```

39         k = V*V/(V*V-1)
40         D = ELV2J * L * k * 2 / ProcArea # v mGy
41         if (L<=10):
42             Q = 1
43         elif ((L>10) and (L<100)):
44             Q = 0.32*L-2.2
45         elif (L>=100):
46             Q = 300 / sqrt(L)
47
48         if (L<=1000): # kvuli rozsahu kalibracni krivky
49             H = D * Q # v mSv
50             outFile.write(data[0]+';'+data[1]+';'+data[2]+';'+data[4]+
51                             '-> ;'+data[5]+';'+str(V)+';'+str(k)+';'+str(L)+';'+str
52                             '-> (D)+';'+str(H)+'\n')
53             L_list.append(L)
54             D_list.append(D)
55             H_list.append(H)
56             V_list.append(V)
57
58             # vyneschava radky s metadaty
59             if (inData == 1):
60                 inData = 2
61             if (str_line[0] == '<' and str_line[7]==')'):
62                 inData = 1
63             if (inData == 0):
64                 vstrup = str_line[:-1].split(',')
65                 if (vstrup[0]==ProcArea):
66                     ProcArea = float(vstrup[1])/1e8
67             outFile.close()
68
69             # zapsani davky a dawkoveho ekvivalentu
70             time=180 #dni
71
72             Dsum = sum(D_list)
73             Hsum = sum(H_list)
74
75             Drate=(Dsum*1000)/time
76             Hrate=(Hsum*1000)/time
77
78             davkaFile.write('D [mGy] = '+str(Dsum)+'\n')
79             davkaFile.write('H [mSv] = '+str(Hsum)+'\n')
80             davkaFile.write('Drate [uGy/day] = '+str(Drate)+'\n')
81             davkaFile.write('Hrate [uSv/day] = '+str(Hrate)+'\n')
82
83             davkaFile.close()
84
85             # vyhotoveni dat na LET spektra
86             print 'pocet stop: ' + str(len(L_list))
87
88             histFile.write('#LET +' + 'cetnost ' + 'davka[uGy]' + ' + ' + 'davkovyEkvivalent[mSv'
89             '-> ] ' + 'fluence [cm^-2 sr^-1]\n')
90
91             # externi soubory obsahují LET intervaly ekvidistantni na log skale
92             intervaly=[]
93             with open('LETintervaly.txt', 'r') as f:
94                 for line in f:
95                     intervaly.append(float(line.strip('\n')))

stredyIntervalu=[]

```

```

95 with open('LETstredyIntervalu.txt', 'r') as f:
96     for line in f:
97         stredyIntervalu.append(float(line.strip('\n')))
98
99 print 'minimalni LET: '+str(min(L_list))
100 print 'maximalni LET: '+str(max(L_list))
101
102 pocetNezaznamenanychStop=0
103 ctnost=[0]*len(stredyIntervalu)
104 davka=[0]*len(stredyIntervalu)
105 davkEkv=[0]*len(stredyIntervalu)
106 Vsum=[0]*len(stredyIntervalu) # pro vypocet dif. fluence
107 for i in xrange(len(L_list)):
108     nezaznamenani=0 # kontrolni promenna (zdali se roztridily vsechny
109     -> stopy)
110     for j in xrange(1,len(intervaly)+1):
111         if (L_list[i]>=intervaly[j-1] and L_list[i]<=intervaly[j]):
112             ctnost[j-1]+=1
113             davka[j-1]+=D_list[i]*1000
114             davkEkv[j-1]+=H_list[i]
115             Vsum[j-1]+=V_list[i]
116             nezaznamenani=0
117             break
118         else:
119             nezaznamenani=1
120     pocetNezaznamenanychStop+=1
121
122 Vprumer=0
123 cosTheta=0
124 fluence=[0]*len(stredyIntervalu)
125 for i in xrange(len(ctnost)):
126     Vprumer=Vsum[i]/ctnost[i]
127     cosTheta=(Vprumer**2-1)/Vprumer**2
128     fluence[i]=ctnost[i]/(2*pi*cosTheta*ProcArea) #ProcArea je
129     -> analyzovana plocha v cm^2
130
131 for i in xrange(len(stredyIntervalu)):
132     histFile.write(str(stredyIntervalu[i])+','+str(ctnost[i])+','+str(
133         -> (davka[i])+','+str(davkEkv[i])+','+str(fluence[i])+'\n'))
134
135 histFile.close()
136
137 print '\ncelkova davka [mGy]: '+ str(Dsum)
138 print 'celkovy davkovy ekvivalent [mSv]: '+ str(Hsum)
139 print 'analyzovana plocha [cm^2]: '+ str(ProcArea)

```