

Obsah

Úvod	8
1 Kosmické záření v blízkém okolí Země	9
1.1 Zdroje kosmického záření v blízkém okolí Země	10
1.1.1 Galaktické kosmické záření	10
1.1.2 Zemské radiační pásy	11
1.1.3 Sluneční události s emisí částic	12
1.1.4 Sekundární částice	13
1.2 Faktory ovlivňující kosmické záření v blízkém okolí Země	13
1.2.1 Fáze slunečního cyklu	13
1.2.2 Sklon oběžné dráhy	14
1.2.3 Nadmořská výška	14
1.2.4 Východní/západní anizotropie zachycených protonů	14
1.2.5 Stínění	15
2 Pasivní detektory používané k monitorování kosmického záření	16
2.1 Termoluminiscenční detektory	16
2.2 Detektory stop v pevné fázi	17
3 Mezinárodní kosmická stanice	19
3.1 Modul Columbus	20
4 Experimenty DOSIS a DOSIS 3D	22
4.1 Rozmístění pasivních detektorů	23
4.2 Průběh experimentů	23
4.2.1 Vývoj nadmořské výšky a slunečního cyklu	25
4.3 Používané detektory	26

4.3.1	Termoluminiscenční detektory	27
4.3.2	Opticky stimulované luminiscenční detektory	28
4.3.3	Detektory stop v pevné fázi	28
4.3.4	Aktivní detektory DOSTEL	28
4.3.5	Detektory používané NPI	29
4.4	Výsledky	30
4.4.1	Srovnání dat pasivních detektorů v rámci jedné sady	31
4.4.2	Srovnání dat z osmi sad pro jeden pasivní detektor	33
4.4.3	Srovnání dat pasivních a aktivních detektorů	34
5	Vyhodnocení tří detektorů stop v pevné fázi	33

2. Pasivní detektory používané k monitorování kosmického záření

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

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

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

2.1 Termoluminiscenční detektory

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

TLD měří spolehlivě částice s LET nižším než cca $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (tato hodnota se liší pro různé materiály), pro vyšší hodnoty LET se účinnost TLD snižuje [5]. Pro lepší popis tohoto jevu se zavádí veličina relativní odezva detektoru RR (relative response)

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

kde $(TL_{\text{odezva}})_Y$, resp. $(TL_{\text{odezva}})_{\gamma}$ je odezva TLD po ozáření dávkou $(D_{\text{tkáň}})_Y$, resp. $(D_{\text{tkáň}})_{\gamma}$, přičemž tyto dávky jsou si číselně rovny. Jinak řečeno RR je definována jako poměr odezev po ozáření stejnou dávkou v tkáni způsobenou částicemi Y a referenčním zářením γ [19].

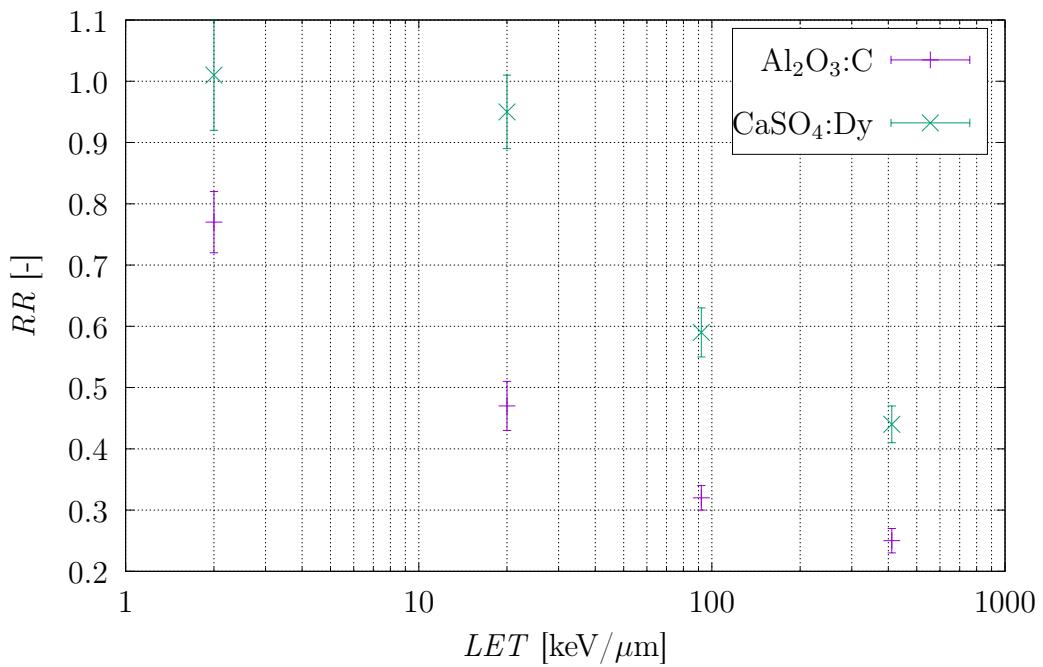
Na vývoj RR se podíláme u dvou TLD používaných Oddělením dozimetrie záření ÚJF AV ČR (v dalším textu je používána anglická zkratka NPI). Jedná se o detektory $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, které se jmenují podle výrobních materiálů. Tyto detektory byly, resp. jsou používány v experimentech DOSIS a DOSIS3D. V tab. 2.1 jsou hodnoty RR těchto detektorů pro částice s různým LET získané při experimentálním ozařování [19]. Lze pozorovat, že s rostoucím LET relativní odezva u obou detektorů klesá, u $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ mnohem rychleji než u $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$; pro názornost jsou data z tabulky znázorněny i v grafu, viz 2.1. Pro zpřesnění měření je potřeba provést korekci TL odezev, více informací v [19].

Částice	LET [$\text{keV}/\mu\text{m}$]	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$	$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$
He	2, 16	$0,77 \pm 0,05$	$1,01 \pm 0,09$
O	20, 00	$0,47 \pm 0,04$	$0,95 \pm 0,06$
Ar	92, 00	$0,32 \pm 0,02$	$0,59 \pm 0,04$
Fe	411, 00	$0,25 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,03$

Tabulka 2.1: Relativní odezvy RR dvou TL detektorů používaných NPI pro částice s různým LET . Data byla získána při experimentálním ozařování detektorů částicemi se známým LET [19].

2.2 Detektory stop v pevné fázi

$$V = \frac{\sqrt{(1 - B^2)^2 + 4A^2}}{1 - B^2}, \quad (2.2)$$



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

kde

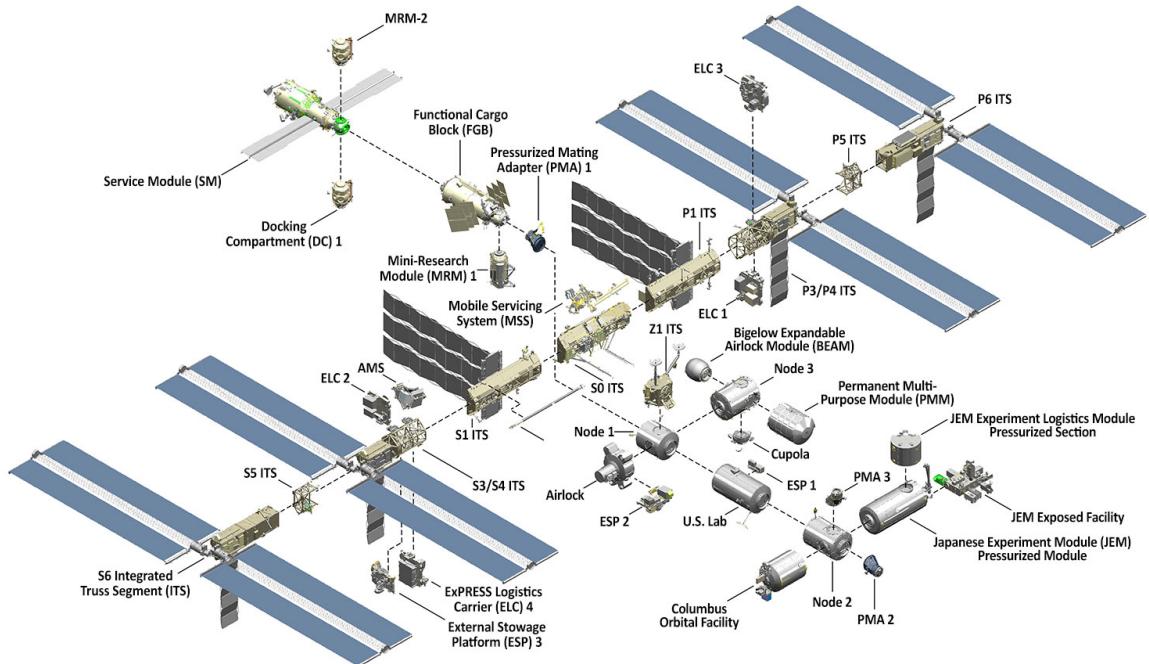
$$A = \frac{a}{2V_B t},$$

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

$$k_\theta = \frac{V^2}{V^2 - 1} \quad (2.3)$$

3. Mezinárodní kosmická stanice

Mezinárodní kosmická stanice (ISS, International Space Station) je družice lidského původu nacházející se v blízkém okolí Země. Obíhá Zemi na orbitě se sklonem dráhy 51° [11] v nadmořské výšce oscilující kolem 400 km rychlostí 28 800 km/h, což znamená, že celou Zem obletí každých 90 min [12]. 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 [11]. 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 [9]. 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 [10]. V tab. 3.1 jsou k dispozici základní parametry stanice.

Tabulka 3.1: Základní parametry ISS [9].

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

Stanice je rozdělena na ruskou a americkou část. Zatímco ruská podléhá výhradně Rusům, americká se skládá z modulů a konstrukcí evropských, japonských, kanadských a amerických. ESA (European Space Agency, Evropská kosmická agentura) je zodpovědná za modul Columbus a za ATV (Automated Transfer Vehicles, automatické transportní vozidla) [13]; podle dohod s NASA má ESA nárok na 51% využití zdrojů modulu Columbus [11].

ISS bude provozována minimálně do roku 2024 [15] a celkové náklady na vybudování, provoz stanice do tohoto roku, výzkum atd. jsou odhadovány na 100 miliard eur, z nich cca 8 miliard je či bude hrazena ESA, resp. jejími 10 členskými zeměmi podílející se na programu (Belgie, Dánsko, Francie, Neměcko, Itálie, Nizozemí, Norsko, Španělsko, Švédsko and Švýcarsko) [14].

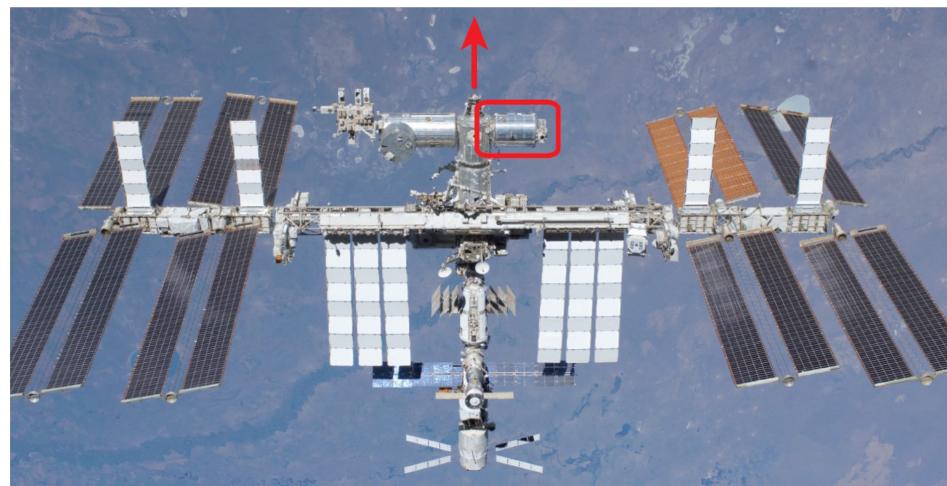
3.1 Modul Columbus

Modul Columbus je největším příspěvkem ESA k ISS.

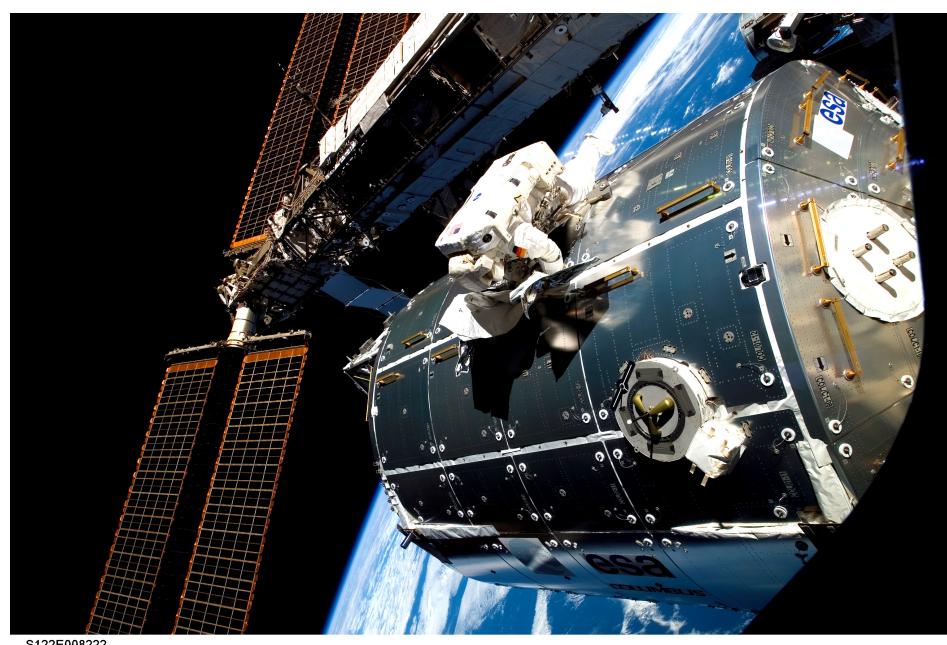
Jedná se o laboratorní modul zaměřený na výzkum v biologii, materiálových vědách, fyziku tekutin a další výzkumy v mikrogravitaci. Obsahuje deset skříňových modulů pro experimenty (International Standard Payload Racks), každý z nich poskytuje nezávislé ovládání energie, chlazení a také komunikaci s pozemními 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). [18].

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



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



Obr. 3.3: Modul Columbus ve srovnání s astronautem [17].

4. Experimenty DOSIS a DOSIS 3D

Informace v této kapitole byly čerpány převážně ze zdrojů [2, 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 vyšetření prostorové distribuce dávky v modulu ISS Columbus a získání dat, která by vedla k vytvoření 3D modelu rozložení dávek/dávkového ekvivalentu.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

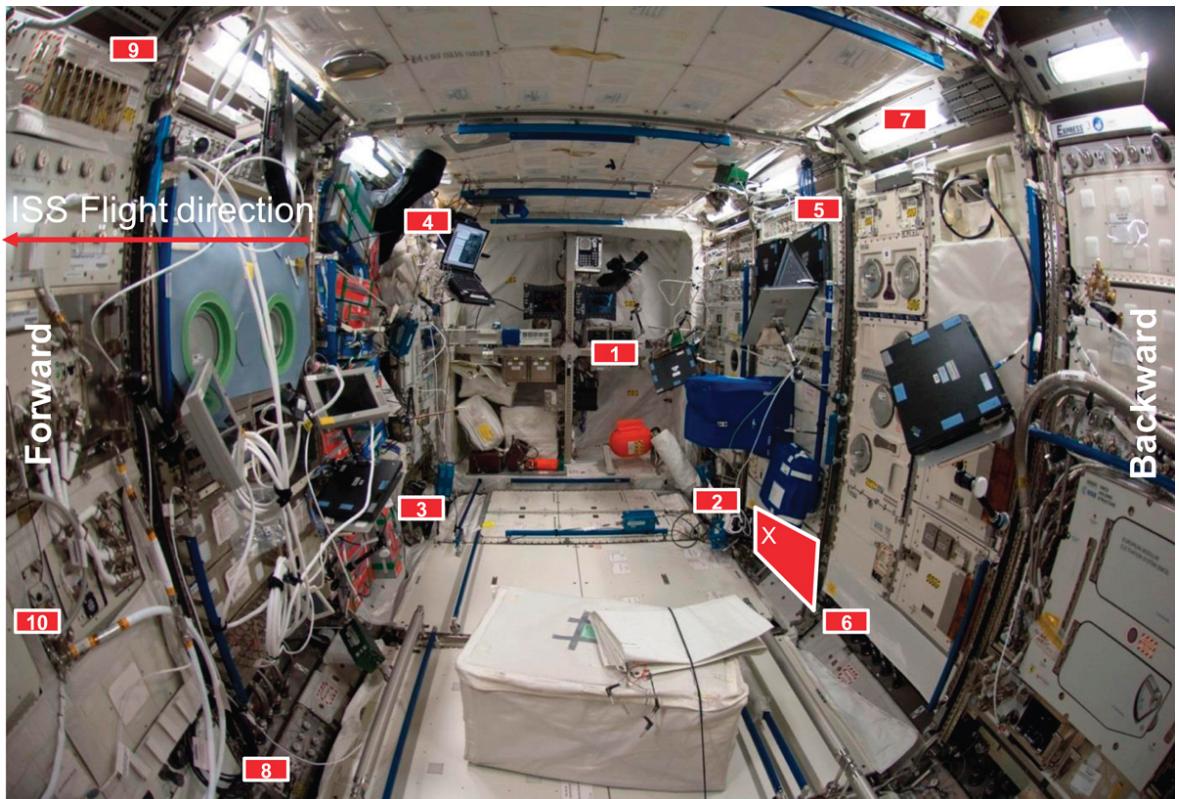
4.1 Rozmístění pasivních detektorů

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

4.2 Průběh experimentů

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

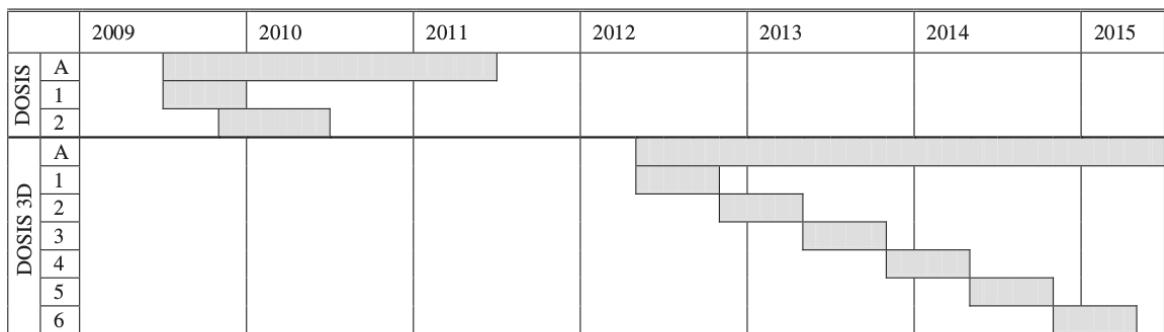
První z experimentů započal 15. července 2009 startem raketoplánu Endeavor,



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

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

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



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

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

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

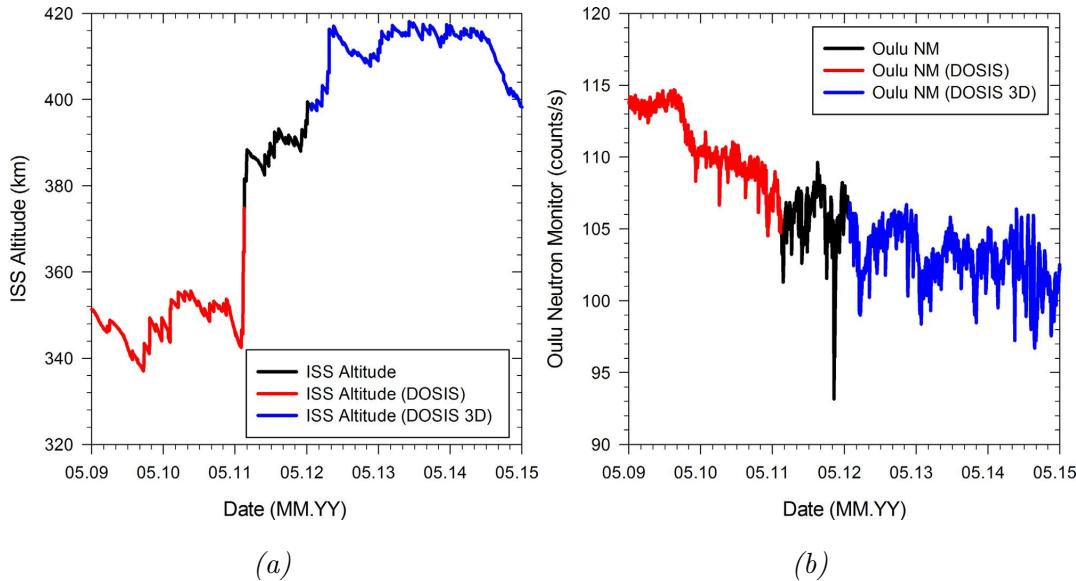
4.2.1 Vývoj nadmořské výšky a slunečního cyklu

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

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

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

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



Obr. 4.2: V (a) je časový vývoj nadmořské výšky ISS: červeně je vyznačen vývoj v rámci DOSIS, modře v rámci DOSIS3D; černě je označen vývoj nadmořské výšky v době, kdy neprobíhal žádný z experimentů. V (b) je naměřená četnost Oulu neutronovým monitorem, značení je stejné jako v (a); klesající vývoj četnosti impulzů značí rostoucí sluneční aktivitu. [2, 22]

4.3 Používané detektory

Tento oddíl pojednává o používaných detektorech v experimentech DOSIS a DOSIS3D. Podrobnější informace o pasivních detektorech (např. jak se určuje absorbovaná dávká a dávkový ekvivalent z naměřených dat; srovnání jednotlivých typů pasivních detektorů) jsou v kapitole 2. O aktivních detektorech tato práce nepojednává, podrobnější informace lze dohledat v [7, 3].

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

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

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

4.3.1 Termoluminiscenční detektory

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

Tabulka 4.4: TL detektory používané různými institucemi.

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

4.3.2 Opticky stimulované luminiscenční detektory

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

4.3.3 Detektory stop v pevné fázi

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

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

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

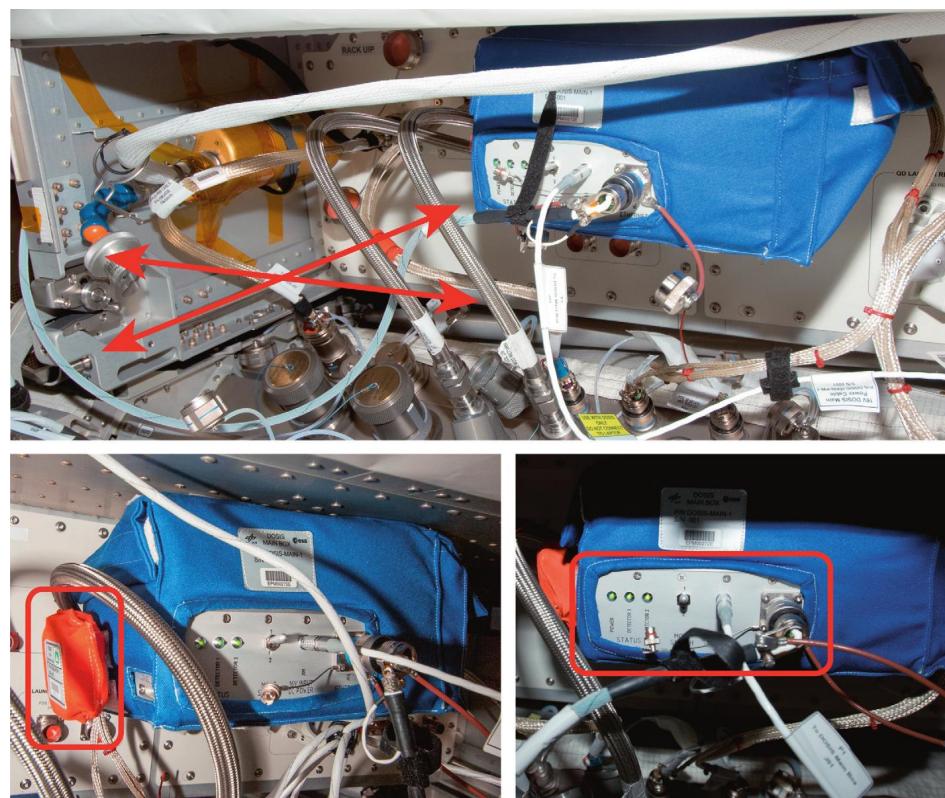
4.3.4 Aktivní detektory DOSTEL

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

dávku a dávkový ekvivalent. DOSTEL dokáže zaznamenávat částice s *LET* v rozsahu 0,5–400 keV/ μm [7].

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

Na obrázku 4.3 je mimo jiné vidět DOSTEL. Informace v tomto oddíle byly brány z [2, 7].



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. [3]

4.3.5 Detektory používané NPI

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

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

Z TED používá NPI HARZLAS TD-1 a od roku 2016 i TASTRAK. HARZLAS TD-1 je leptán 18 hodin za teploty $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ v 5 N koncentrovaném roztoku NaOH; odleptaná vrstva je tlustá $15,3\text{ }\mu\text{m}$. Celkově je analyzována plocha o velikosti $0,09\text{ cm}^2$. Detektor je tlustý 0,9 mm. TASTRAK se leptá dvoufázově: první fáze trvá 6 hodin a jsou při ní zobrazeny stopy vytvořené částicemi s velkým *LET*; při druhé fázi, která trvá dalších 9 hodin, se zobrazí i stopy pocházejících od častic s nižším *LET*. Celkový čas leptání je tedy 15 hodin. Buď se postupuje postupným leptáním (6 hodin leptání, vyhodnocení, 9 hodin leptání, vyhodnocení), nebo se část detektoru leptá 6 hodin a část 15 hodin, tudíž detektor lze vyhodnotit najednou. Detektor se leptá při $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ v 6,25 N koncentrovaném roztoku NaOH, odleptaná vrstva je tlustá $8,04/20,1\text{ }\mu\text{m}$; analyzuje se plocha o velikost $0,5\text{ cm}^2$ (v obou případech). Po leptání následuje u obou detektorů nasnímání stop lineárním snímacím zařízením s vysokým rozlišením (které je součástí mikroskopu HSP-1000, [23]), poté jsou snímky se stopami analyzovány programem HspFit.

TASTRAK původně využívaný pouze MTA EK začíná být používán i ostatními organizacemi, jelikož různorodost využívaných TED a jejich způsobů vyhodnocení komplikuje vzájemné porovnávání a interpretaci naměřených dat [20].

Informace byly brány z [2].

4.4 Výsledky

Zde jsou uvedeny výsledky publikované v [2]. Jedná se o data naměřená TL a OSL detektory z obou sad DOSIS a z prvních šesti sad DOSIS3D, tedy o data naměřená mezi lety 2009 a 2015. Pro větší názornost jsou zde uvedeny i obrázky z [3], které byly získány z dat naměřených aktivními detektory.

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

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

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

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

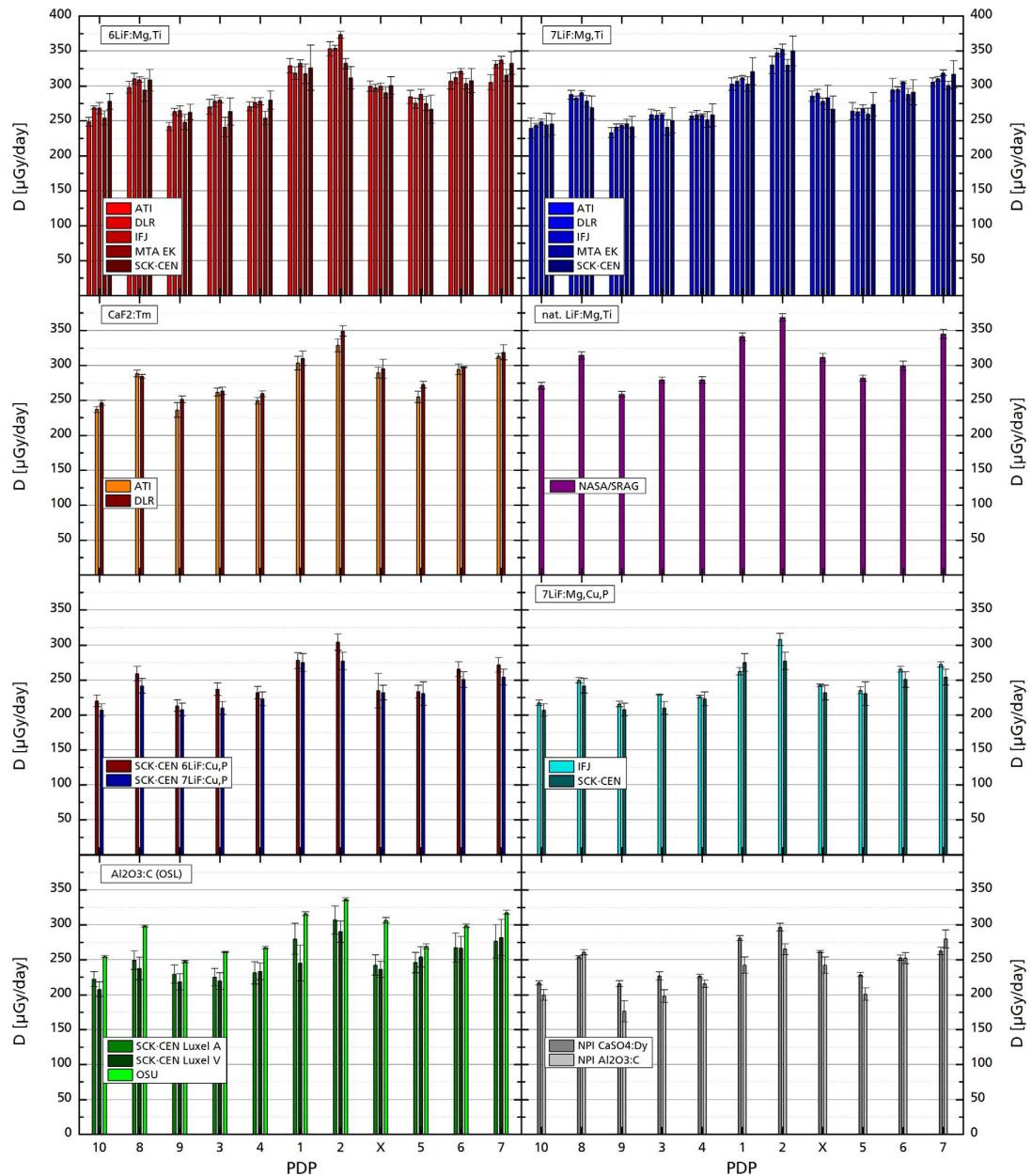
4.4.1 Srovnání dat pasivních detektorů v rámci jedné sady

V obr. 4.4 jsou uvedeny dávkové příkony naměřené detektory z 2. sady DOSIS3D v závislosti na pozici detektoru, tzn. na PDP. Jedná se o TL detektory z materiálů: $^6\text{LiF:Mg,Ti}$; $^7\text{LiF:Mg,Ti}$; $\text{CaF}_2:\text{Tm}$; $^{^{\text{Nat}}}\text{LiF:Mg,Ti}$; $^6\text{LiF:Mg,Cu,P}$; $^7\text{LiF:Mg,Cu,P}$; $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 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 nabitého částic každého TL/OSL materiálu (viz oddíl 2.1); to je např. případ materiálů $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ používaných NPI.

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

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

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



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

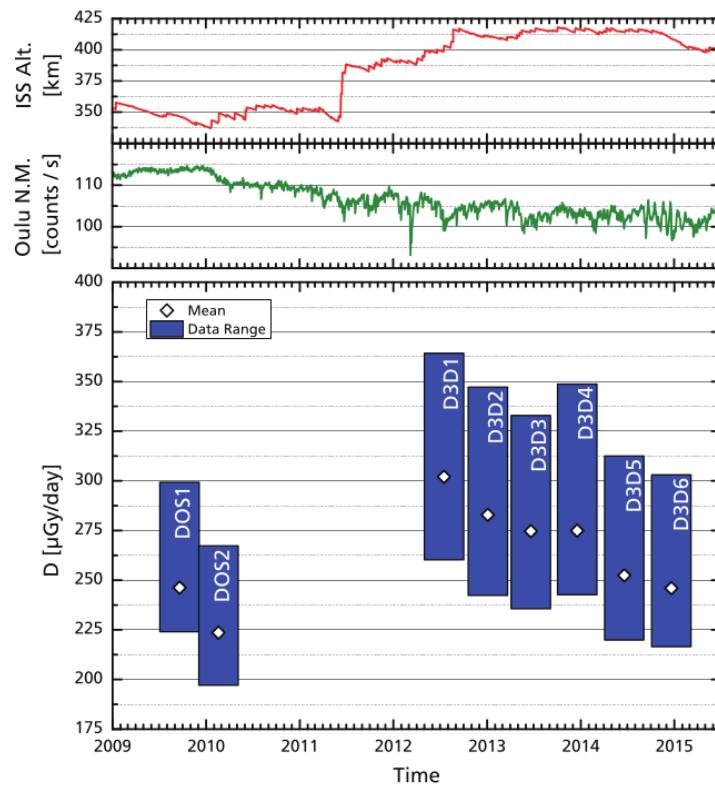
(“gamma-equivalent neutron dose”), [2].

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

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

4.4.2 Srovnání dat z osmi sad pro jeden pasivní detektor

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



Obr. 4.5: Rozsahy dávkových příkonů naměřených TLD materiálem ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ v rámci prvních osmi sad experimentů DOSIS a DOSIS3D. V horní části obrázku jsou parametry ovlivňující velikost obdržené dávky, tj. nadmořská výška ISS a četnost neutronů naměřená Oulu monitorem [22], která souvisí se sluneční aktivitou.

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

zachycených protonů v SAA (viz oddíl 1.2.4).

4.4.3 Srovnání dat pasivních a aktivních detektorů

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

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

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

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

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

Seznam literatury

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

Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond.

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

ISSN 0168-583X. Dostupné také z:

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

Advanced Topics in Solid State Dosimetry.

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

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

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

3. 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).

4. 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>.

5. 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.

6. 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.
7. 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).
8. WIKIPEDIA, Otevřená encyklopédie.
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.
9. GARCIA, Mark. *Station Facts and Figures* [online]. 2016 [cit. 2017-04-17].
Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/facts-and-figures>.
10. 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>.
11. WIKIPEDIA, Otevřená encyklopédie. *Mezinárodní vesmírná stanice* [online].
2017 [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mezin%C3%A1rodn%C3%AD_vesm%C3%ADrn%C3%A1_stanice.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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>.

16. ESA. *A view of the European Columbus laboratory attached to the International Space Station* [online]. 2008 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2008/02/A_view_of_the_European_Columbus_laboratory_attached_to_the_International_Space_Station.
17. 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.
18. 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.
19. 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).
20. 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.
21. 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.
22. USOSKIN, Ilya. *Cosmic Ray Station of the University of Oulu* [online]. [Cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://cosmicrays.oulu.fi>.
23. AVČR, ODZ ÚJF. *Mikroskop HSP-1000* [online]. [Cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://cesky.odz.ujf.cas.cz/home/vybaveni/mikroskop-hsp-1000>.