

Radiační pozadí na Zemi, v letadle a na oběžné dráze

VLADIMÍR VÍCHA

Gymnázium, Pardubice, Dašická 1083; ÚTEF ČVUT Praha

MARTIN KAPLAN

Student Gymnázia, Pardubice, Dašická 1083

Abstrakt

V příspěvku jsou prezentovány výsledky měření radiačního pozadí detektorem MX-10 na povrchu Země a v dopravním letadle a měření pixelovým detektorem stejného typu na družici. Z dlouhodobých měření bylo určeno složení radioaktivity při povrchu Země se zaměřením na stopy mionů. Radiační pozadí na Zemi je porovnáno s pozadím ve výšce, kde létají dopravní letadla, a byl také sestrojen graf závislosti toku částic ionizujícího záření v průběhu letu na lince Londýn – Praha. Můžeme se seznámit s vypočtenými hodnotami dozimetrických veličin na Zemi a v letadle. Změny toku částic ionizujícího záření zaznamenaných zařízením SATRAM na družici Proba-V v průběhu letu jsou vizualizovány v závěru příspěvku.

Úvod

Na minulých Veletrzích nápadů jsme mohli vidět možnosti pixelového detektoru MX-10 při detekci radioaktivity. Zabývali jsme se vizualizací a základními vlastnostmi ionizujícího záření přirozených i umělých zářičů. Nyní se zaměříme na zkoumání radiačního pozadí v různých výškách zemské atmosféry.

Radiační pozadí při povrchu Země

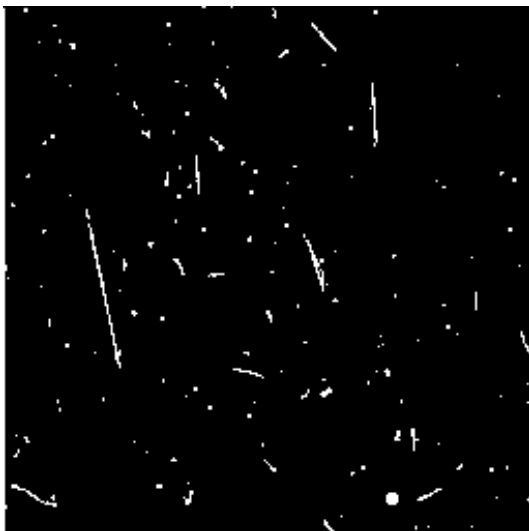
Položme si otázku, jak vypadá radiační pozadí například v našem obývacím pokoji, kde stráví rodina hodně času.

Detektor MX-10 jsme umístili tak, aby rovina čipu byla vertikálně (obr. 1) a provedli jsme osmiminutové měření.

Měření proběhlo v Pardubicích v přízemí rodinného domku. Integrální snímek měření vidíme na obr. 2.



Obr. 1. Měření detektorem MX-10 s čipem ve vertikální poloze.



Obr. 2. Radiační pozadí naměřené v obývacím pokoji. Doba expozice byla 8 minut.

Obslužný program Simple preview rozlišuje stopy ionizujících částic na obr. 2 do čtyř kategorií. Velká kruhová stopa při dolním okraji je způsobená dopadem částice alfa. Tato radioaktivita pochází pravděpodobně z radonu nebo jeho dceřiných produktů.

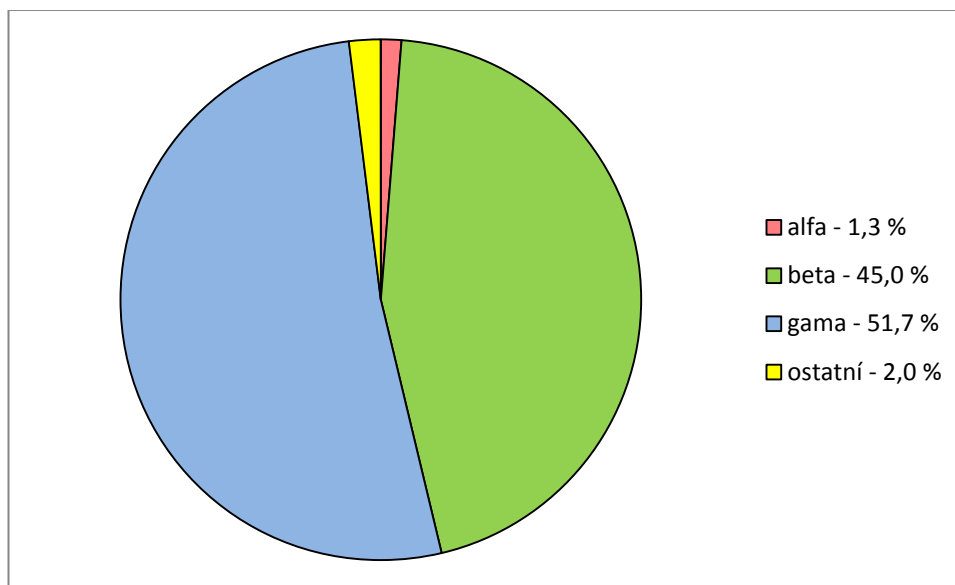
Protáhlé a zakroucené stopy připomínající červíky jsou způsobené radioaktivitou beta.

Malé bodové stopy jsou způsobené nejčastěji radioaktivitou gama.

Stopy ve tvaru delších úseček program zařazuje do kategorie ostatní.

Chceme-li dobře určit procentuální složení jednotlivých typů radioaktivity, je třeba udělat měření s velmi dlouhou expoziční dobou. Provedli jsme dvě stohodinová měření a sestrojili graf na obr. 3.

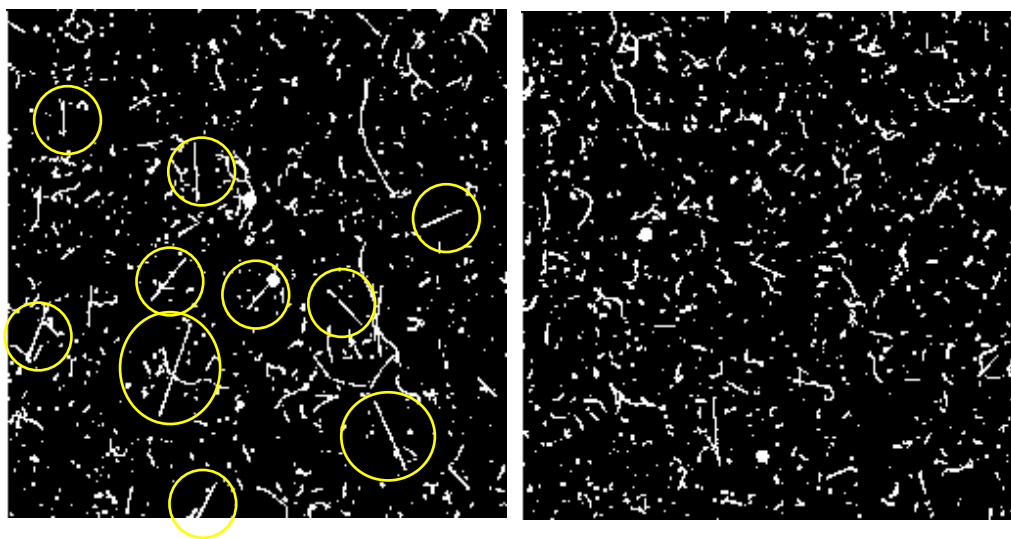
hou expoziční dobou. Provedli jsme dvě stohodinová měření a sestrojili graf na obr. 3.



Obr. 3. Zastoupení čtyř typů radioaktivity v radiačním pozadí obývacího pokoje. Celková doba expozice byla 200 hodin.

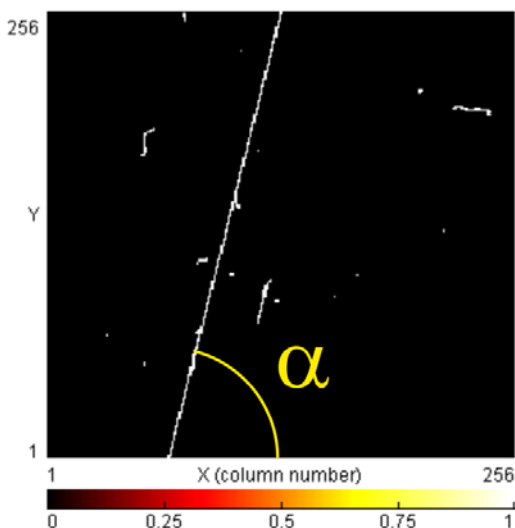
Vidíme, že převládá radioaktivita gama a beta, nejméně je zastoupena radioaktivita alfa. V následujících měřeních jsme se zaměřili na kategorii „Ostatní“, která má přibližně dvouprocentní zastoupení a v níž jsou započteny stopy tvaru delších úseček. Odkud pochází radioaktivita, která v čipu zanechává takové stopy?

Provedli jsme ještě jedno dlouhodobé měření, tentokrát s čipem v horizontální poloze. Na obr. 4 jsou snímky s dobou expozice 1 hodina a různou orientací čipu. Jaký vidíme rozdíl?



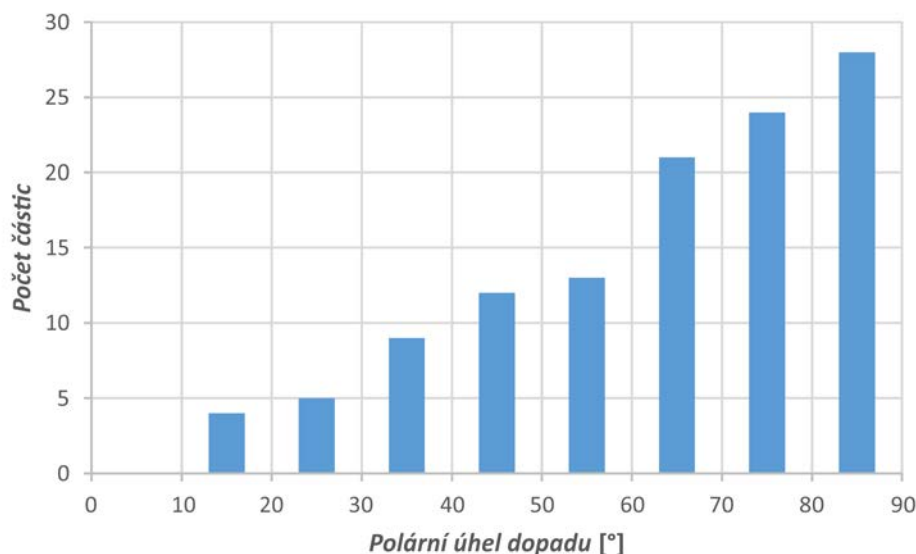
Obr. 4. Vlevo je hodinové měření s čipem ve vertikální poloze. Vpravo je hodinové měření s čipem v horizontální poloze.

Na obr. 4 vlevo je deset stop ve tvaru delší úsečky, zatímco vpravo podobné stopy chybí. Když si uvědomíme, že tloušťka čipu je 0,3 mm, tak z pravého obrázku lze usoudit, že částice, které způsobují „úsečkové stopy“, z míst nízko nad horizontem nepřicházejí. Tyto částice sice nezanechávají „úsečkové stopy“ v čipu orientovaném horizontálně, ale zanechávají stopy, které detektor zařazuje do kategorie gama.



Obr. 5. Polární úhel dopadu. Jde o vzácnou stopu mionu, který letěl prakticky v rovině čipu. Čip byl ve vertikální poloze.

Úsečky na obr. 4 vlevo mají většinou směr blízky směru svislému. Částice asi pocházejí z prostoru nad naší hlavou a může jít o miony, které vznikají v sekundárních sprškách kosmického záření. Pro lepší vyhodnocení směrů dopadu sestrojíme histogram polárního úhlu dopadu. Pro každou stopu mionu o velikosti nejméně 20 pixelů jsme určili souřadnice krajních bodů úsečky a z nich vypočítali polární úhel (viz obr. 5). Tyto údaje sloužily k sestrojení histogramu polárního úhlu dopadu.



Obr. 6. Histogram polárního úhlu dopadu.

Ze statistiky 116 mionů vyplývá, že nejvíce mionů dopadlo z výšky 80° až 90°, zatímco z výšky do 10° nad obzorem nedopadly žádné miony. Chceme-li porovnat výsledky experimentu s teorií, musíme zabrousit do speciální teorie relativity, kterou vyučujeme na středních školách.

Studentům říkáme, že dilataci času potvrzuje detekce mionů při povrchu Země. Miony vznikají v atmosféře ve výškách několik kilometrů až desítek kilometrů po dopadu primárních částic kosmického záření. Miony jsou nestabilní částice, které se se střední dobou života $\tau_0 = 2,2 \mu\text{s}$ rozpadají na elektron, elektronové antineutrino a mionové neutrino. Po svém vzniku letí miony k Zemi téměř rychlostí světla. Miony jsou rychlé, ale jejich doba života je malá. Mohou tedy doletět, než se rozpadnou? Provedeme výpočet, ve kterém budeme předpokládat rovnoměrný přímočarý pohyb mionu rychlostí řekněme $v = 0,999c$ (ve sprškách se vyskytují i rychlejší miony).

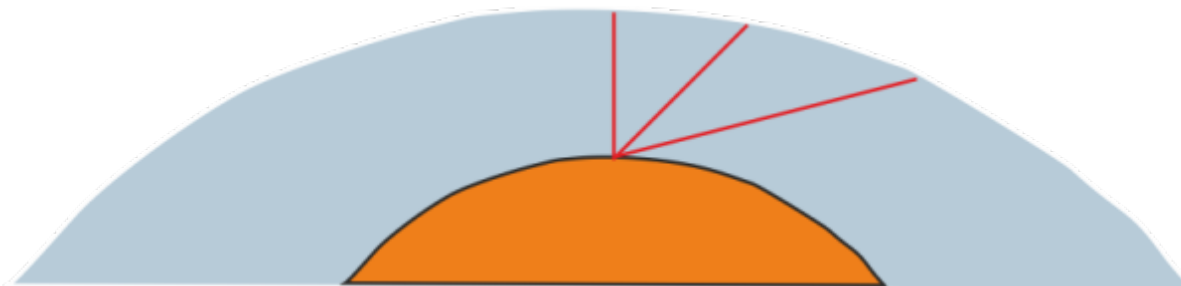
Podle klasické fyziky uletí mion do svého rozpadu dráhu

$$s = v \cdot \tau_0 = 659 \text{ m.}$$

Na Zemi by tedy doletět neměl. My ale miony detekujeme. Provedeme relativistický výpočet s přihlédnutím k dilataci času.

$$s = v \cdot \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 14\,750 \text{ m}$$

Tento výsledek již dává možnost mionům, které vznikly například ve výšce 10 km a letí svisle (úhel dopadu je 90°), doletět na povrch Země. Pokud ale mion letí blízko horizontu ve směru, kde je atmosféra „tlustší“ než 15 km (obr. 7), na Zemi nedopadne.

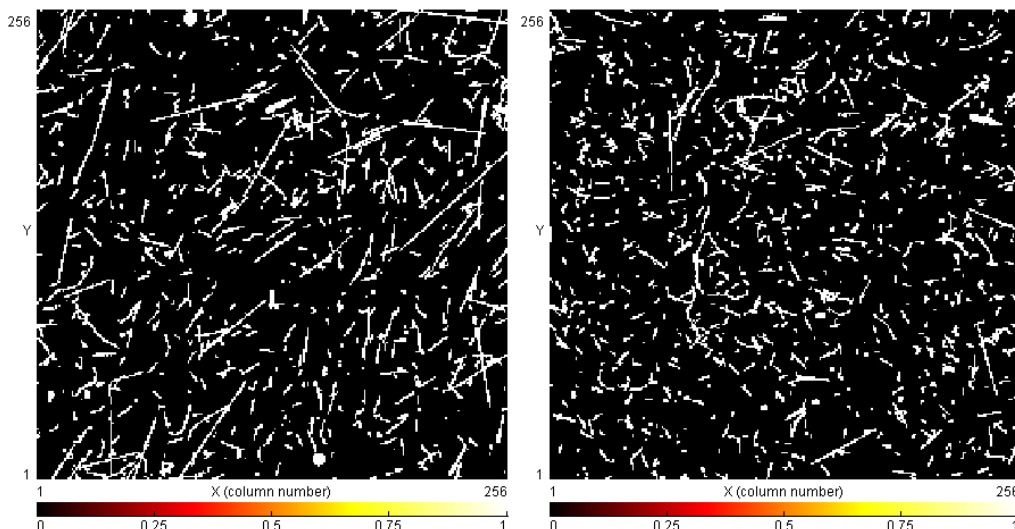


Obr. 7. Atmosféra je ve směru blízkém horizontu tlustší.

Tato teorie je v dobrém souladu s tím, co jsme naměřili. Můžeme ji ještě ověřit tak, že se vydáme za miony do vyšších vrstev atmosféry. Nabízí se měření v letadle.

Radiační pozadí v letadle

Následující měření byla provedena v září 2014 v letadle na lince Praha – Londýn a Londýn – Praha.



Obr. 8. Radiační pozadí měřené v letadle ve výšce přibližně 11 km nad Zemí s expoziční dobou 8 minut. Levý záznam byl naměřen s čipem ve vertikální poloze a pravý záznam s čipem v horizontální poloze.

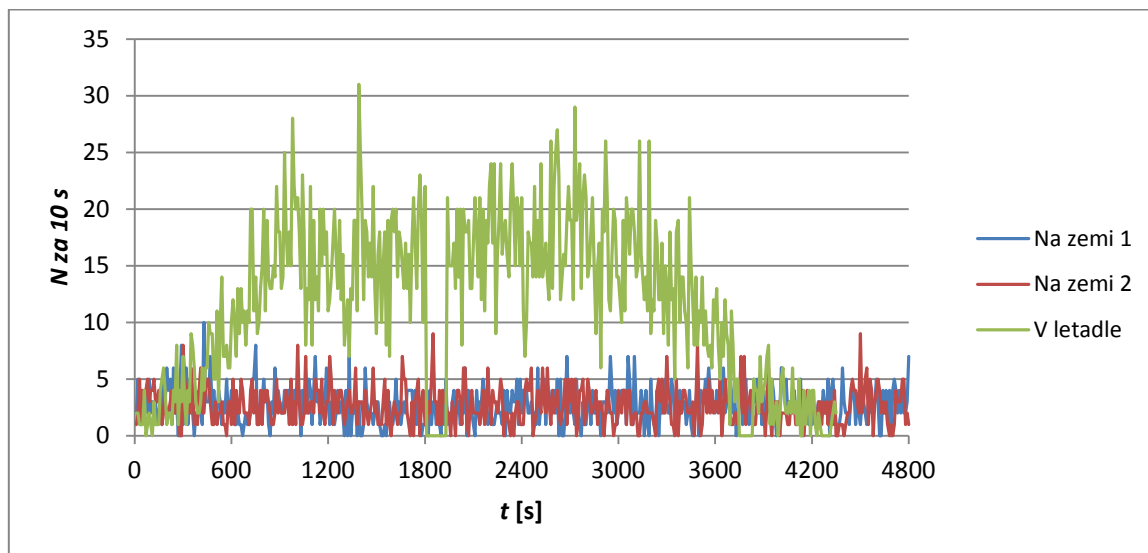
Na obr. 8 je osmiminutový záznam měřený ve výšce 11 km nad zemí. Můžeme porovnat obr. 8 naměřený v letadle a obr. 2 naměřený na Zemi (doba expozice byla stejná). Lze učinit tři závěry.

1. Tok všech ionizujících částic je v letadle několikanásobně větší než na Zemi.
2. Stop způsobených miony je v čipu orientovaném vertikálně ve srovnání s měřením na Zemi podstatně více.
3. Stopy mionů se v malém množství vyskytují i v čipu orientovaném horizontálně.

Měření potvrdilo, že ve vyšších vrstvách atmosféry je mionů podstatně více než na Zemi, protože miony s menšími rychlostmi nestačily „vymřít“. Naměřili jsme také

malé množství mionů letících přibližně horizontálně, protože v těchto směrech není atmosféra tak „tlustá“ jako na povrchu Země.

Vedle vizualizace stop jsme v průběhu téměř celého letu provedli měření toku částic. Expoziční doba pro každý snímek byla nastavena na 10 s. Měření bylo zahájeno krátce po startu z Londýna a ukončeno krátce před přistáním v Praze. Závislost naměřeného toku na čase vidíme na obr. 9.



Obr. 9. Tok částic za 10 sekund v průběhu sedmdesátiminutového letu Londýn – Praha. Přibližně po půlhodině měření bylo měření z důvodu uložení dat na chvíli přerušeno.

Na průběhu zeleného grafu na obr. 9 dobře vidíme, jak po startu tok částic vzrůstá, po dosažení letové výšky se ustálí na určité střední hodnotě a před přistáním opět klesá. Pro srovnání jsou v grafu na obr. 9 zachycena modrou a červenou barvou dvě dlouhodobá měření pozadí na povrchu Země.

Můžeme učinit závěr, že v letové výšce 11 km je tok částic přibližně sedmkrát větší než na povrchu Země. Nabízí se otázka, zda není radiace pro posádku a cestující v letadle nebezpečná.

Pro vyhodnocení vlivu ionizujícího záření na látku, respektive lidský organizmus se používají radiologické veličiny.

$$\text{Dávka} \quad D = \frac{E}{m} \quad [D] = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1},$$

kde E je energie záření pohlcená látkou o hmotnosti m .

$$\text{Dávkový ekvivalent} \quad H = D \cdot Q \quad [H] = \text{Sv} \dots \text{sievert},$$

kde D je dávka a Q je jakostní faktor, který zohledňuje vliv různých druhů a energií ionizujícího záření na lidský organizmus.

Příkon dávkového ekvivalentu $H_p = \frac{H}{t}$ $[H_p] = \text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$,

kde H je dávkový ekvivalent a t je doba expozice. Častěji používaná jednotka při měření radiačního pozadí je $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$.

Pro porovnání námi naměřených hodnot ročního příkonu dávkového ekvivalentu s oficiálními údaji jsme použili výsledky dostupné v [1]:

přírozené radiační pozadí $H_p = 2 \text{ mSv/rok}$

lékařská vyšetření $H_p = 1 \text{ mSv/rok}$

norma pro osoby pracující s ionizujícím zářením $H_p = 50 \text{ mSv/rok}$

Nejprve jsme museli provést výpočet faktoru Q , který přesahuje rámec tohoto článku, proto uvedeme jen výsledky příkonu dávkového ekvivalentu:

přírozené radiační pozadí na Zemi $H_p = 2 \text{ mSv/rok}$

přírozené radiační pozadí v letadle $H_p = 63 \text{ mSv/rok}$.

Vidíme, že přírozené radiační pozadí na Zemi se shoduje s oficiálními údaji v [1]. Radiace v letadle je však přibližně třicetkrát vyšší a roční H_p přesahuje hodnoty normy dokonce i pro osoby pracující s ionizujícím zářením. Zároveň je ale třeba říci, že posádka nelétá ve výšce 11 km celých 365 dní v roce. Pokud by ročně nalétala 600 hodin, obdržela by dávkový ekvivalent 4,3 mSv. To podle [1] odpovídá jednomu rentgenovému vyšetření trávicího traktu.

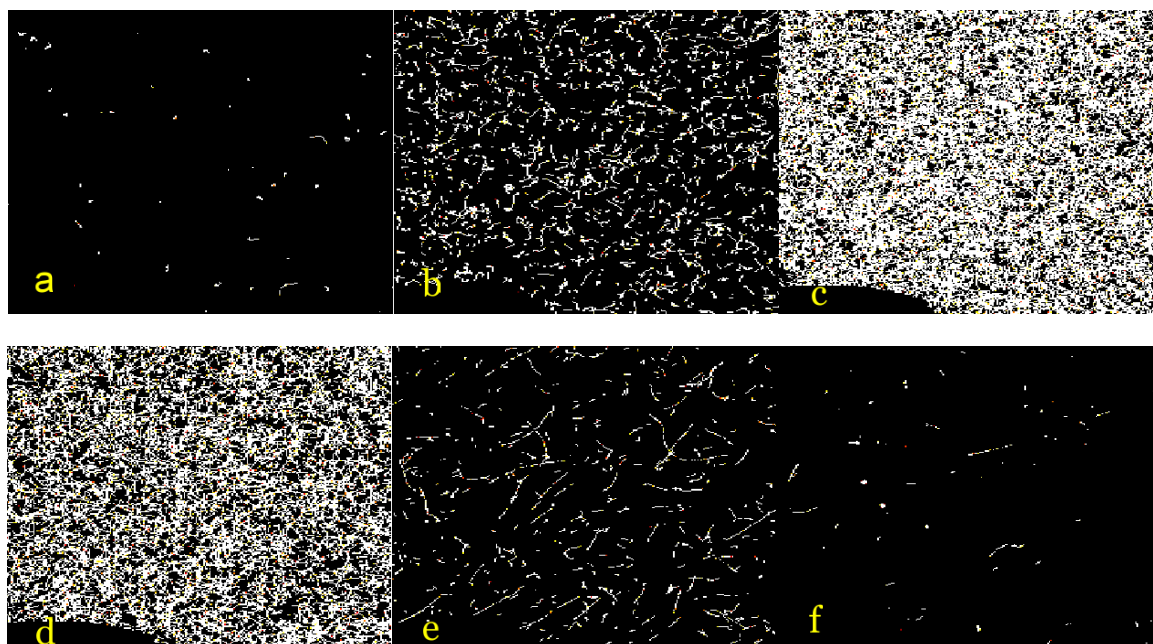
A jak je to s cestujícími? Obdržený dávkový ekvivalent během letu Praha – Londýn a zpět byl přibližně 0,014 mSv. Vliv radiace na cestující můžeme tedy považovat za nevýznamný a obr. 9 spíše vypovídá o výborné citlivosti MX-10.

Radiační pozadí na oběžné dráze

Posádka letadel sice nelétá 365 dní v roce, ale posádka ISS pobývá na oběžné dráze souvisle řadu měsíců. Tato stanice létá přibližně ve výšce 400 km, kde není chráněna atmosférou a zde radiace bude jistě ještě silnější.

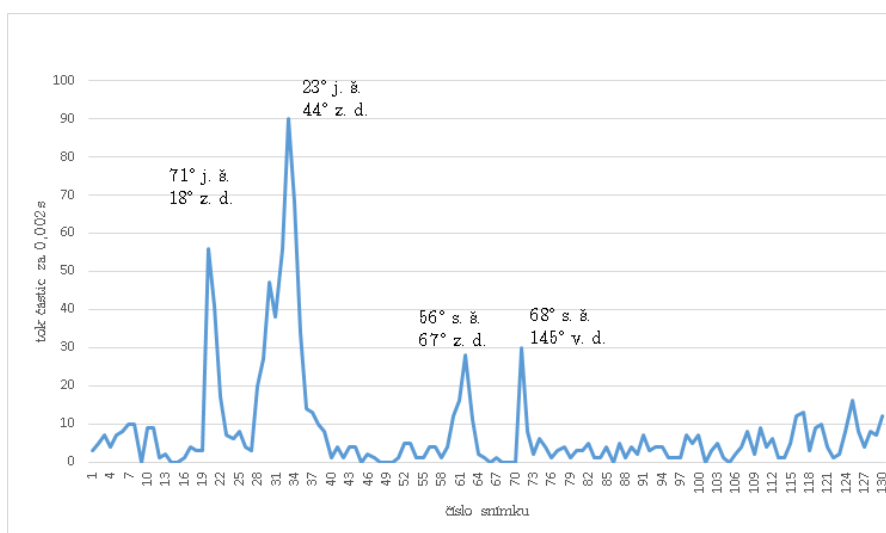
Pro mapování radiace na oběžné dráze bylo na družici Proba-V vypuštěnou ESA 7. 5. 2013 umístěno české zařízení SATRAM. Jde o pixelový detektor pracující na stejném principu jako MX-10, který připravili pracovníci ÚTEF ČVUT v Praze. Během letu měří detektor cyklicky snímky s expozicí 0,002 s, 0,2 s a 20 s a data se odesílají na ÚTEF, kde se zpracovávají. K těmto datům jsme dostali přístup.

Je třeba ještě zmínit, že družice létá po kruhové trajektorii ve výšce 820 km nad Zemí a její oběžná doba je 101 min. Mezi každými dvěma snímky na obr. 10 uplynul čas 38 s a družice uletěla vzdálenost přibližně 283 km.



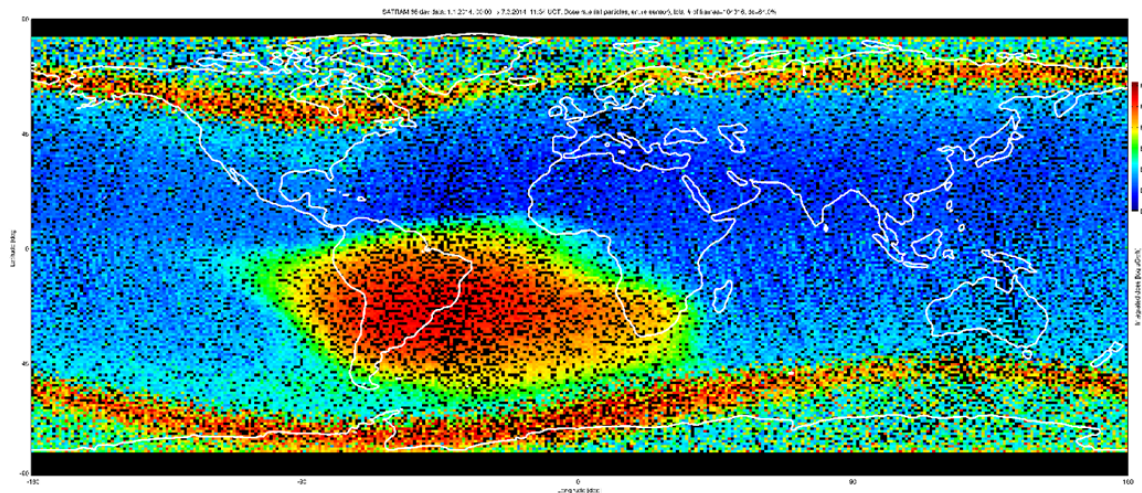
Obr. 10. Měření radiačního pozadí na družici Proba-V. Bylo vybráno 6 po sobě následujících snímků s dobou expozice 0,2 s.

Na obr. 10a až 10f vidíme průlet pásem silné radiace. Na některých snímcích je tok částic až 200 000krát větší než tok se stejnou dobou expozice naměřený na Zemi. Místa se zvýšenou radiací se nacházejí v polárních oblastech (obr. 10), ale také nad jižním Atlantikem a Jižní Amerikou. Záznam toku ionizujících částic během jednoho obletu družice je na obr. 11.



Obr. 11. Tok částic za 0,002 s v průběhu 101 minut (jeden oblet Země).

Z dlouhodobého záznamu dat vznikla v ÚTEF mapa rozložení dávkového příkonu ve výšce 820 km nad Zemí (obr. 12).



Obr. 12. Mapa rozložení dávkového příkonu z dat SATRAM.

Modrá barva odpovídá nízkým a červená vysokým hodnotám dávkového příkonu. Mapa byla převzata z [2].

Mapa dávkového příkonu souvisí s magnetickým polem Země. Víme, že nabité částice přicházejí především od Slunce, ale i z celého vesmíru, a magnetické pole Země je stáčí do polárních oblastí. Zde mohou vyvolávat polární záře. Nemusí být však stáčeny jen do polárních oblastí. Velká červená skvrna na obr. 12 s nejsilnější a nejrozsáhlejší radiací se nazývá Jihoatlantická anomálie. Poskytuje nám informaci, že magnetické pole Země je zde deformované. Průlety Jihoatlantickou anomálií ve výšce letu družice by pro kosmonauty znamenaly vysokou zdravotní zátěž.

⁽¹⁾ Úloha je ve skutečnosti složitější, protože ve sprškách vznikají miony o různých rychlostech.

Literatura

- [1] Broklová Z.: Učíme jadernou fyziku, ČEZ a.s., 2008
- [2] Granja C.: Jihoatlantická anomálie vnitřního radiačního pásu Země. Vesmír 2014, roč. 93
- [3] „Proba-V,“ ESA, [Online]. Dostupný z: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Proba-V/. [Přístup získán 2. 8. 2015].