

# Detektory radiace pro použití na Měsíci

Nedávno jsem slyšel na Radiožurnálu příspěvek Bez Česka už do kosmu nic neodletí. Redaktor pořadu měl pravdu, protože mnoho českých společností již desítky let vyvíjí, vyrábí a dodává komponenty družic a nyní také evropských nosných raket, které ve vesmíru plní náročné technické a vědecké funkce. Jistě tomu napomůže Národní kosmický plán, schválený v říjnu 2018, pro léta 2020 až 2025, který však má své počátky v roce 2008, po vstupu ČR do EU.

Ve výzkumu vesmíru se významně uplatňují velmi pokročilé komponenty, např. detektory záření, na jejichž vývoji se podílejí odborníci z Ústavu technické a experimentální fyziky ČVUT (ÚTEF ČVUT) v Praze. Detektory se používají již mnoho let na palubě Mezinárodní kosmické stanice ISS a podle současných plánů NASA budou nejnovější modely detektorů poslány v modulech s lidskou posádkou na oběžnou dráhu Měsíce a později v přistávacích sondách na jeho povrch.

## Vývoj detektorů v ÚTEF ČVUT

Detektory mají mnohaletou historii. V roce 2013 byla ČVUT založena samostatná spin-off firma Wipepix, spol. s r. o., poz-



Obr. 1. Detektor Timepix (foto: ÚTEF ČVUT)

ději přejmenovaná na Advacam, spol. s r. o. Pracovníci, kteří odešli z ÚTEF a tvoří jádro firmy, ji dnes úspěšně komerčně provozují, a to na základě dlouhodobé licenční smlouvy mezi oběma subjekty. Advacam dodává na



Obr. 3. Astronaut Chris Cassidy a detektor záření na palubě ISS (foto: NASA)

trh detekční systémy na bázi detektorů Medipix a Timepix, vyvinutých ve spolupráci s Evropskou organizací pro jaderný výzkum CERN v Ženevě a za aktivní účasti pracovníků ÚTEF ČVUT, které dále rozvíjí podle požadavků různých partnerů.

Příkladem takového vývoje je pixelový detektor v miniaturizované architektuře LITE, který byl vyroben ještě v ÚTEF ČVUT a NASA jej použila na ISS jako dozimetrické záření. Jeho komerční rozšíření již pak pro NASA zajišťovala firma Advacam. Metodika využití těchto detekčních systémů pro dozimetrii v komplexních radiač-

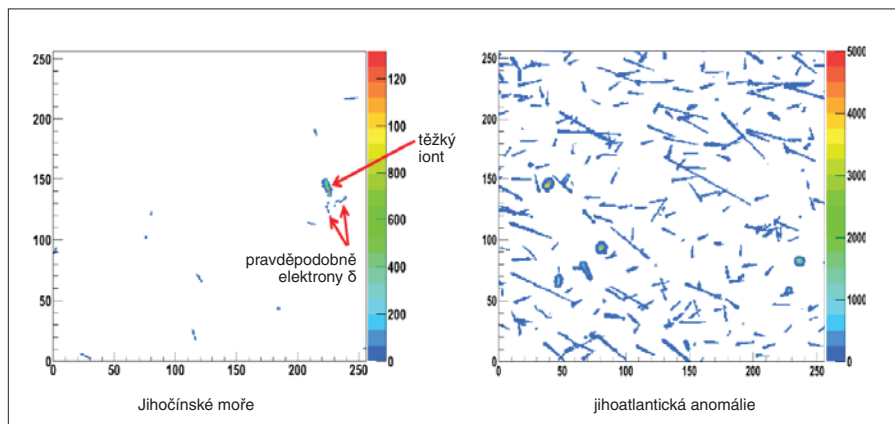
ních polích očekávaných ve vesmíru je přitom v USA a v dalších vyspělých zemích chráněna dvěma společnými patenty připravenými v rámci spolupráce ÚTEF ČVUT a vývojových laboratoří ve švýcarském středisku CERN.

„Těší nás současné úspěchy firmy Advacam, které se, v návaznosti na dlouhodobé vědecko-výzkumné aktivity ÚTEF ČVUT zaměřené na vývoj hybridních pixelových detektorů ionizujícího záření, daří uplatňovat jako high-tech výrobky v řadě oborů,“ uvádí doc. Ivan Štekl, ředitel ÚTEF ČVUT.

Pracovníci ÚTEF ČVUT se dlouhodobě věnují uplatnění detektorů v kosmickém výzkumu. Jejich detektory upravené pro náročné podmínky panující v kosmu již byly vyslány na několik družic (Proba-V v roce 2013, český VZLUSAT-1 v roce 2017, japonský RISESAT v roce 2019). V současné době ÚTEF ČVUT připravuje detekční systémy pro další kosmické projekty, např. satelit GOMX-5 agentury ESA, misi pro hledání vody na Měsíci, lunární orbitální stanici Gateway nebo tchajwanský satelit na oběžné dráze Měsíce. Důležitá aktivita probíhá i v rámci konsorcia EU projektu PAN pro vývoj detektoru na bázi kombinace pixelových a stripových detektorů.

## Původní určení a současné možnosti využití

Koncem 90. let minulého století vyvíjeli inženýři a fyzici v laboratořích CERN integrované obvody pro pixelové detektory, původně potřebné k detekování částic v projektu Velkého hadronového urychlovače (LHC,



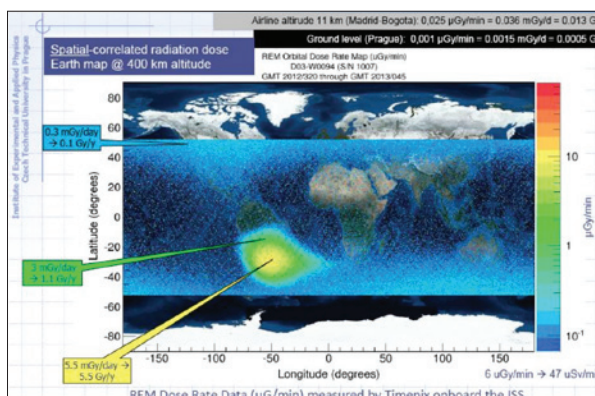
Obr. 2. Výstupy detektoru Timepix2 (foto: ÚTEF ČVUT)

*Large Hadron Collider*). Uvědomili si, že přidání počítačů ke každému pixelu a počítání počtu částic dopadajících na senzory by mohlo umožnit použití čipů pro lékařské zobrazování. Zrodil se tak čip Medipix2. Později čip označený Timepix přidal schopnost zaznamenávat buď čas přiletu částic, nebo energii uloženou v pixelu.

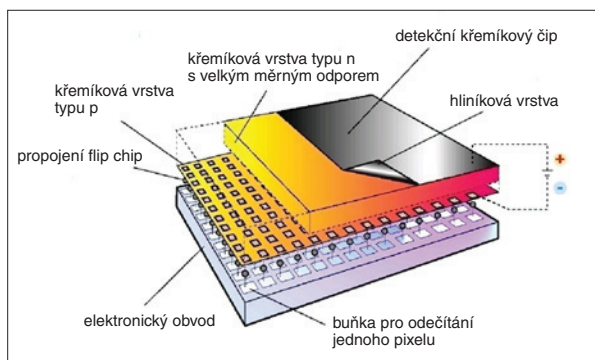
Jak by mohly být mikročipy vyvinuté pro detektory v LHC použity mimo fyziku vysokých energií? To byla otázka, která vedla k dalším rodinám čipů pixelových senzorů Medipix a Timepix. Vědci viděli mnoho příležitostí, jak tyto čipy využít, a za posledních dvacet let zmíněné čipy našly uplatnění v lékařském zobrazování, při zjišťování padělků umění, při detekci radioaktivního materiálu apod. Nedávné sympozium CERN si připomnělo dvě desetiletí od založení spolupráce Medipix2 v roce 1999.

### Detektory na nízké oběžné dráze Země

Charakterizace pole ionizujícího záření na palubě Mezinárodní vesmírné stanice (ISS) je nezbytná pro hodnocení rizika jak pro hardware, tak pro astronauty. *Radiation Environment Monitor* (REM) je výzkumné zařízení, jehož cílem je vyhodnotit efektivnost malých hybridních pixelových detektorů Timepix na bázi křemíku pro detekci zá-



Obr. 4. Mapa dávek měřených ISS nad jižním Atlantikem (foto: ÚTEF ČVUT)



Obr. 5. Konfigurace detektoru

ření v prostoru nízké oběžné dráhy (408 km), po které ISS obíhá planetu.

Zařízení s křemíkovým detektorem Timepix (*obr. 1*) pro monitorování radiace na palubách kosmických těles má malou hmotnost a malou spotřebu energie. Hybridní detektory pixelů Timepix využívají analogově-digitální převodník Wilkinsonova typu k detekci hodnoty TOT (*Time Over Threshold*) pro každý pixel úměrně k odebranému náboji z pixelu. S využitím TOT k energetické kalibraci poskytují detektory Timepix energeticky rozlišenou pixelovou mapu stop částic na křemíkovém detektoru (*obr. 2*). Takové stopy mají podobu shluků korelovaných (většinou sousedních) pixelů s nenulovou hodnotou. Detektor používá USB konektor typu A pro přímé připojení k počítačům ISS Station Support Computers (*obr. 3*). Zařízení Timepix má pole 256 × 256 pi-

## Medipix a Timepix

První čip Medipix, jehož cílem bylo umožnit počítání jednotlivých fotonů na velké matici pixelů, byl vyvinut v polovině 90. let minulého století. V následujících dvaceti letech byly vyvinuty dvě rodiny čipů. Rodina čipů pro počítání fotonů Medipix zahrnuje Medipix, Medipix2 a Medipix3. Čip čtvrté generace, Medipix4, je ve vývoji. Čipy Timepix byly původně více zaměřeny na detekci jednotlivých částic a do této rodiny patří Timepix, Timepix2 a Timepix3. Čip čtvrté generace, Timepix4, je také ve vývoji.

Jde o hybridní detektory, protože vrstva polovodičového senzoru je přímo spojena s vrstvou elektroniky, která signály zpracovává.

Vrstva senzoru je polovodič, Si, GaAs nebo CdTe, ve kterém dopadající záření vytváří elektronovou díru nebo mrak. Náboj se poté shromažďuje na pixelové elektrody a prostřednictvím nárazových vazeb se vede do vrstvy elektroniky CMOS.

Pixelová elektronika nejprve zesílí signál a poté porovná amplitudu signálu s předem nastavenou úrovní diskriminace (energetický práh). Následně zpracování signálu závisí na typu zařízení. Je-li signál nad úrovní diskriminace, standardní detektor Medipix zvyšuje hodnotu čítače v příslušném pixelu. Zařízení Medipix rovněž obsahuje hor-

ní úroveň diskriminace, a proto lze přijímat pouze signály v rozsahu amplitudy (v energetickém okně).

Zařízení Timepix umožňují kromě počítání ještě dva další provozní režimy. První z nich je režim Time-over-Threshold (analogově-digitální převodník typu Wilkinson). Jde o režim, kdy čítač v každém pixelu zaznamenává dobu, během které energie pulzu zůstává nad úrovní diskriminace. Toto číslo je úměrné energii detekovaného záření. Uvedený režim je užitečný pro sledování částic nebo pro přímé spektrální zobrazování.

Druhým režimem čipu Timepix je „čas přiletu“, ve kterém čítače pixelů zaznamenávají čas mezi spuštěním a detekcí kvantity záření s energií nad úrovní diskriminace. Tento provozní režim nachází uplatnění v úlohách Time of Flight (TOF), např. při zobrazování neutronů.

Každý jednotlivý zásah záření je zpracován elektronikou integrovanou v každém pixelu, takže zařízení lze považovat za 65 536 jednotlivých detektorů. Energetické hodnoty jsou nastavitelné. Proto je možné skenováním jejich úrovní měřit celé spektrum přicházejícího záření, což umožňuje úplné spektroskopické rentgenové zobrazování.

Medipix2, Timepix a Medipix3 mají 256 × 256 pixelů. Každý pixel je čtverec o hraně 0,055 mm (55 μm), takže celková plocha je 14,08 × 14,08 mm. Detektory větší plochy lze vytvořit spojením více čipů s většími monoli-

tickými senzory. Běžně se používají detektory velikostí od 2 × 2 do 2 × 4 čipů. Protože senzory jsou bez okrajů, lze vytvořit oblasti bez mezer. Ostatní čipy Medipix a Timepix mají každý svůj vlastní senzor. Tyto sestavy jsou vedle sebe a vytvářejí téměř libovolně velká pole detektorů (největší sestava využívající tuto techniku má čipy 10 × 10, tedy 14 × 14 cm a 2 560 × 2 560 pixelů).

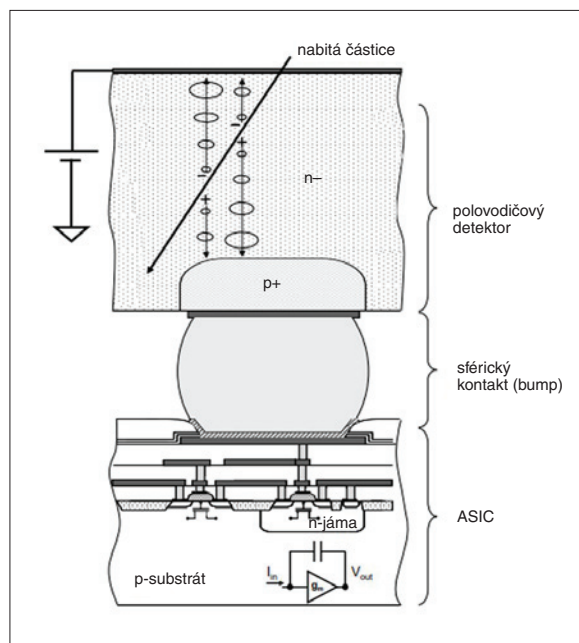
Timepix3 je nástupcem čipu Timepix. Jednou z největších rozlišovacích změn je přístup k odečtu dat. Všechny předchozí čipy využívaly odečet na základě snímků, tj. byla čtena celá pixelová matice najednou. Timepix3 má odečet založený na událostech, kde jsou hodnoty zaznamenané v pixelech čteny bezprostředně po zásahu spolu se souřadnicemi hledaného pixelu. Čip proto generuje nepřetržitý proud dat, ne sekvenci snímků. Dalším významným rozdílem oproti předchozímu čipu Timepix je schopnost měřit amplitudu zásahu současně s dobou přiletu. Ve srovnání s původním čipem Timepix byly také vylepšeny další parametry, jako je měřená energie a rozlišení časování.

Digitální data zaznamenaná zařízeními Medipix a Timepix jsou přenášena do počítače pomocí odečtové elektroniky. Ta je také zodpovědná za nastavení a řízení parametrů detektoru. V rámci spolupráce na projektu Medipix bylo vyvinuto několik odečtových systémů.



xelů o velikosti  $55 \mu\text{m}^2$ , které umožňuje mapování náboje shromážděného během období akvizice, označovaného jako datový rámeček. Aktuální zařízení mají maximální frekvenci sběru rámečků čtyři snímky za sekundu.

Letový software na oběžné dráze poskytuje minimální možnosti analýzy a kromě funkce získávání dat je primárně určen jen ke spuštění jednotky a ověření její činnosti posádkou. Podpůrný software Ground Analysis je navržen tak, aby umožňoval podrobnější analýzu a vizualizaci shromážděných dat (obr. 4). Ilustrační obrázky obr. 5 a obr. 6 vysvětlují základní funkce a konfigurace detektorů Timepix a Medipix.



Obr. 6. Schéma detekce v detektoru

## Budoucnost: lety v hlubokém vesmíru

Vzhledem k výborným výsledkům měření detektorem Timepix na ISS plánuje NASA zařazení těchto detektorů do budoucích kosmických programů průzkumu v okolí Měsíce a na jeho povrchu.

Plánované je jejich použití v nové kosmické kabině Artemis i na oběžné stanici Měsíce Gateway (obr. 7).

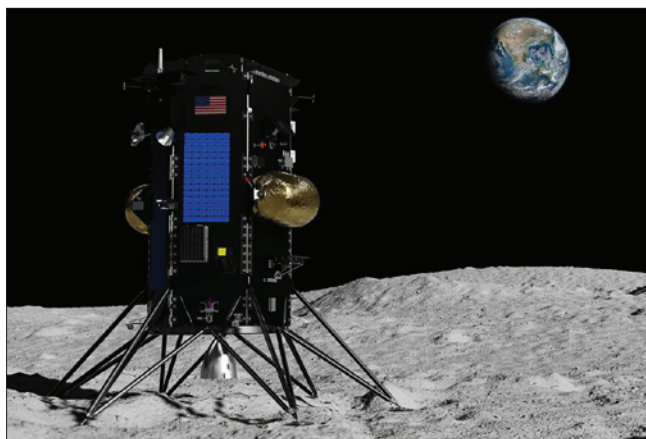
Jakmile se astronauti vydají za ochrannou atmosféru a magnetické pole Země, jsou vystaveni vysoce energeticky nabitým částicím, které mohou mít nepříznivé účinky na zdraví, včetně zvýšeného rizika rakoviny, změn motorických funkcí a chování a degenerativních účinků na tkáň. Většina astronautů na palubě ISS je ve vesmíru po dobu šesti měsíců na nízké oběžné dráze Země, tedy stále pod jejím ochranným polem, které snižuje jejich radiační zátěž. Dopady záření na lidské tělo při dlouhých misích na Měsíc nebo na Mars jsou však mnohem větší.

Souprava výzkumných přístrojů pro detekci záření bude uvnitř prvního modulu víceúčelové mezinárodní základny, který bude na vysoce eliptické sedmidenní oběžné dráze kolem Měsíce. Stanice nazývaná Gateway, Brána, poskytne hlavní podporu pro udržitelný a dlouhodobý návrat člověka na měsíční povrch v rámci programu Artemis a bude sloužit jako místo zastávky pro průzkum v hlubokém vesmíru.

Vědci doufají, že vyvinou další způsoby předpovídání změn v kosmickém počasí a boje proti potenciálně škodlivým účinkům záření, aby zajistili, že astronauti zůstanou zdraví i při letech na velkou vzdálenost. K tomu přispívají přesnější měření radiačního prostředí v hlubokém vesmíru.



Obr. 7. Lunární stanice Gateway, Brána (grafika: NASA)



Obr. 8. Měsíční přistávací modul IM Nova-C (grafika: NASA)

Měření záření a data poskytovaná zařízením Internal Dosimeter Array (obsahujícím poslední verzi detektorů Timepix) umožní studium účinků stínění záření a zdokonalí modely radiační fyziky pro stanovení vlivu na vznik rakoviny, onemocnění kardiovaskulárního systému a centrálního nervového systému, což pomůže posoudit riziko posádky při průzkumných misích.

bude potěšující vědět, že na palubách kosmických prostředků budou významná zařízení vyrobená v České republice.

[Informace ČVUT v Praze, CERN, University of Houston, IEAP Prague, NASA a InsightART.]

Petr V. Liška