

Na palube kozmických sond

(Skrátené a upravené vyšlo v mesačníku pre vedu a techniku QUARK 5 / 2000)

Kozmický výskum konca dvadsiateho storočia sa stal neodmysliteľnou súčasťou koloritu našej doby a právom upútava pozornosť miliónov ľudí na celom svete. Táto doména síce náleží predovšetkým niekoľkým svetovým veľmociam, avšak aj mnohé menšie krajiny prispievajú k výskumu a mierovému využitiu kozmu, zvyčajne v rámci svojich národných kozmických programov. Aj keď Slovensko na rozdiel od mnohých malých krajín (susedné nevynímajúc) zatiaľ nemá svoj oficiálny národný kozmický program ani zabehnuté centrálné inštitúcie ktoré by ho v tejto oblasti reprezentovali v zahraničí, viaceré slovenské pracoviská úspešne pracujú v kozmickom výskume už po niekoľko desaťročí. Jedným z nich je **Ústav experimentálnej fyziky SAV** v Košiciach, ktorého kozmický program siaha už vyše 30 rokov dozadu. Počiatky kozmického výskumu na ÚEF boli spojené s pozemnou registráciou kozmického žiarenia vo vysokohorskom laboratóriu na Lomnickom štíte.

Kozmofyzikálny výskum nemohol zostať dlho „na zemi“ a už prvé kozmické sondy vyslané človekom nad atmosféru Zeme priniesli vzrušujúce geofyzikálne objavy. Medzi prvé fyzikálne fenomény, registrované kozmickými družicami, patrili toky nabitých energetických častíc a hneď prvá americká družica EXPLORER-1 zaznamenala svojimi Geiger-Müllerovými detektormi zvláštnu priestorovú konfiguráciu týchto tokov - tzv. Van Allenove radiačné pásy. Tento objav ukázal, že Zem svojim magnetickým poľom vychyluje a do radiačných pásov „uväzňuje“ elektricky nabitú, vysoko energetickú časticu, ktoré by inak mohli bombardovať atmosféru a povrch Zeme a tým ohrozoval život na nej. Ďalšie a ďalšie vyslané kozmické sondy postupne zmapovali okolozemský priestor a na základe ich vedeckých dát postupne bol (a stále je) upresňovaný model ešte oveľa komplexnejšieho, štruktúrovaného, magnetizovaného plazmového objektu, zemskej magnetosféry, ktorá je celkovým produktom mohutnej interakcie slnečného vetra a magnetického poľa Zeme. Až moderná kozmická fyzika ukázala, že Slnko pôsobí na Zem a na život na nej nielen všeobecne známou gravitáciou a elektro-magnetickým žiarením (sem patrí o.i. aj jeho svetlo a teplo), ale aj mohutným korpuskulárnym žiarením, ktorého geofyzikálny význam vôbec nie je zanedbateľný. Brzdenie nabitých energetických častíc v atmosfére Zeme vo vyšších zemepisných šírkach spôsobuje nielen známu polárnu žiaru, ale predstavuje aj značný energetický prínos s príslušnými dôsledkami napr. na globálny vývoj počasia - známa je napr. chronická tlaková níz nad severným Atlantikom v blízkosti magnetického pólu Zeme, kde častice do atmosféry ľahšie prenikajú pozdĺž siločiar magnetického poľa. Vzhľadom na tesnú interakciu nabitých častíc so zemským magnetickým poľom, spôsobujú väčšie zmeny ich toku aj na Zemi pozorovateľné poruchy jej magnetického poľa, známe ako

magnetické búrky. Dôsledky veľkých magnetických búrok sprevádzaných zosilnenou radiáciou, sú veľmi závažné pre šírenie elektromagnetických vln, činnosť pozemných telekomunikačných a energetických sústav a môžu byť až fatálne pre telekomunikačné družice a pre posádky pilotovaných kozmických letov.

Práve na poli registrácie tokov energetických častíc na umelých družiciach Zeme sa v minulosti uchytil aj ÚEF-SAV. Vývoj jeho registračných družicových aparátúr však nikdy neprebíhal izolovane, ale každá aparatúra bola objednaná a špecifikovaná širším medzinárodným vedeckým tímom s určitým konkrétnym vedeckým zámerom a programom. Bohaté a plodné medzinárodné kontakty s mnohými špičkovými svetovými kozmofyzikálnymi pracoviskami dokázal zabezpečiť predovšetkým **doc. Ing. Karel KUDELA, DrSc.**, terajší vedúci Oddelenia kozmickej fyziky (OKF) ÚEF-SAV.

Prvá časticová aparatúra ÚEF s označením **PG-1** ešte nebola vyvinutá priamo na pôde ústavu, ale objednaná na Matematicko-fyzikálnej fakulte Karlovej univerzity v Prahe a štartovala do kozmu na palube družice INTERKOZMOS-3 (1970), neskôr aj jej ďalšie varianty **PG-1A** (na IK-5) a **PG-1B** (na IK-13). Vývoj ďalšej aparatúry **SK-1** už bol objednaný na Katedre rádiotechniky EF-VŠT v Košiciach (t. č. je to Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií FEI-TU), kde sa neskôr realizoval aj vývoj prístroja **URE-1** (*detektor Uhlového Rozdelenia Elektrónov*) pre sondážnu raketu VERTICAL-10. Vzhľadom na silnejúcu spoločenskú objednávku prístrojovej techniky pre kozmický výskum bolo napokon v roku 1974 z iniciatívy doc. Kudelu založené špecializované pracovisko priamo na pôde ÚEF, kde z Katedry rádiotechniky spolu s rozpracovanou aparatúrou SK-1 prišiel pracovať jej konštruktér **Ing. Jozef ROJKO, CSc.** Tým bol položený základ vývojovo-realizačnej skupiny kozmickej techniky, ktorá pracuje na ÚEF-SAV dodnes a Ing. Rojko sa stal až do odchodu na zaslúžilý odpočinok (marec 1996) jej vedúcim a šéfkonštruktérom väčšiny realizovaných aparátúr.

Kozmická prístrojová technika patrí medzi najnáročnejšie technické disciplíny vyvíjané človekom. Zabezpečenie vysokej dlhodobej spoľahlivosti a stability je v podmienkach otvoreného kozmu vždy problematické, keďže sa prístroje musia podrobiť tvrdému ionizujúcemu žiareniu, extrémnym zmenám teploty, vysokému vákuu a taktiež veľmi silným akceleráciám a vibráciám počas štartu kozmického nosiča. A to všetko pri zachovaní veľmi drastických váhových, rozmerových a energetických limitov. Závažným špecifikom je aj pomerne úzky informačný kanál, ktorým musia kozmické meracie prístroje odovzdať nameranú informáciu na Zem, čo sa nezaobíde bez nutnosti dátovej kompresie a predspracovania informácie už na palube kozmickej sondy. Zabezpečenie uvedených kritérií v podmienkach západných pracovísk kozmického výskumu vedie k veľmi vysokým nákladom na kozmickú techniku, ktorú vystihuje pomerne kuriózna, ale s nevelkými odchýlkami naozaj platná rovnica, podľa ktorej 1 kilogram typického kozmického prístroja zaberá

objem 1 liter, spotrebuje 1 Watt energie a celkové náklady na jeho realizáciu sú 1 milión amerických dolárov. Prvé tri položky tejto rovnice približne platia aj pre prístroje realizované na ÚEF, posledná položka býva asi o dva rády nižšia. Ani na tak lacnú výrobu kozmickej techniky sa však nikdy nenašla adekvátne tuzemská podpora a viaceré prístroje z ÚEF by do kozmu najskôr nikdy nepoleteli, keby sa na základe medzinárodných vedeckých kontaktov nepodarilo získať zahraničných partnerov, ktorí mali eminentný záujem o vedecké dáta a zabezpečili aspoň tie najdrahšie komponenty – najmä polovodičové detektory a kozmicky kvalifikované elektronické súčiastky. A pritom sa smerom „navonok“ vždy jednalo o zahraničnú reprezentáciu a smerom „dovnútra“ o transfer cenného „know-how“, t.j. moderných kozmických technológií a manažmentu kozmických projektov.

DOK-T

Aparatúra DOK-T bola už od počiatku vyvíjaná na ÚEF pre experiment PROGNOZ-8 a súčasne začala sériu ďalších úspešných časticových spektrometrov typu DOK (*Detektor Ochladzovaný Kremikový*), s pasívne chladenými kremíkovými detektormi. Pozostávala z dvoch častí – bloku detektorov a bloku elektroniky. Detektorový blok obsahoval dva paralelne orientované polovodičové detektory, z ktorých jeden bol exponovaný



Spektrometer DOK-T bol prvým kozmickým prístrojom, od začiatku realizovaným priamo na pôde novovzniknutej vývojovo-realizačnej skupiny kozmickej techniky v roku 1974. Zároveň bol prvým prístrojom, ktorý využíval pasívne chladenie polovodičových detektorov na elimináciu ich šumu

energetickými časticami priamo, druhý bol exponovaný cez brzdnú mylarovú fóliu. Pretože brzdný efekt tejto fólie je podstatne účinnejší pre ióny ako pre ľahké elektróny, tento pár (po príslušnej fyzikálnej kalibrácii) umožnil do určitej miery odlíšiť iónovú a elektrónovú zložku časticového toku. Fyzikálny princíp samotných polovodičových detektorov energetických častíc spočíva v generovaní párov elektrón-diera v polovodičovom materiáli v dôsledku odovzdania energie ionizujúcej častice

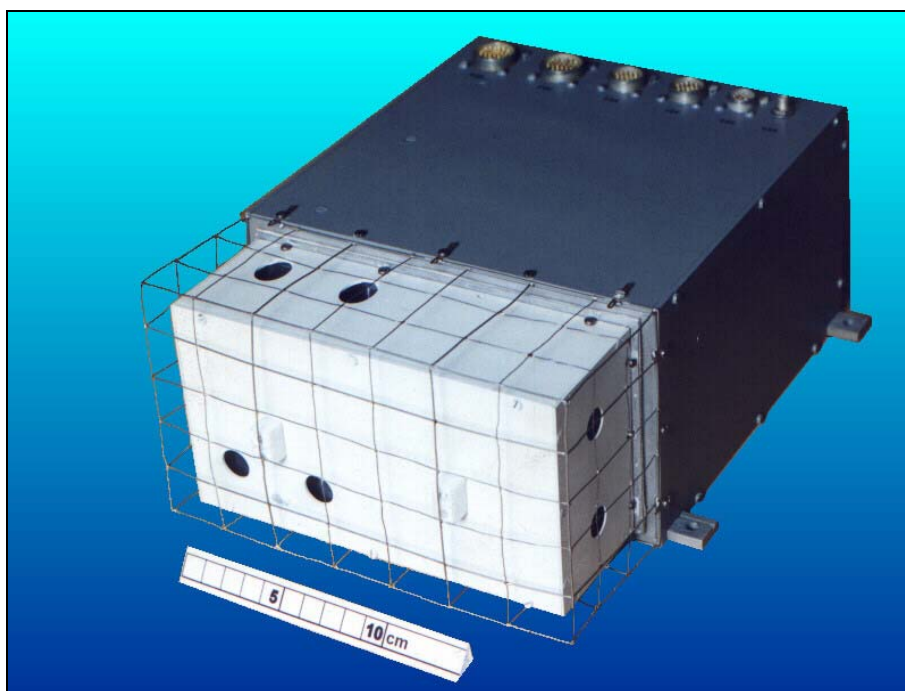
materiálu polovodiča. Pritom je počet týchto párov priamo úmerný odovzdanej energii, a za predpokladu, že častica stratila v detektore všetku svoju energiu, vieme jej celkovú energiu stanoviť zmeraním množstva uvoľneného náboja. O to sa už postará nábojovo citlivý zosilňovač a ďalšie analógové a digitálne elektronické obvody.

Limitujúcim faktorom časticovej spektrometrie s polovodičovými detektormi je šum samotných detektorov. Pretože šum polovodičových detektorov klesá s ich teplotou, bola v aparátúre DOK-T prijatá koncepcia pasívneho chladenia, ktorá využíva skutočnosť, že objekt umiestnený na tieňovej strane družice môže vyžiariť svoje teplo do kozmického pozadia a takto sa významne ochladiť. Toto samozrejme predpokladá heliocentrickú orientáciu družice (jedna jej os trvalo smeruje na Slnko) a nastavenie takého tepelného odporu medzi telesom sondy a ochladzovaným objektom, ktorý mu zabezpečí potrebnú teplotu. Teoreticky (pri ideálnej izolácii) by bolo možné ísť až po termodynamickú rovnováhu s teplotou kozmického pozadia, t.j. 2,7K (asi -270°C). Dosiahnuť až takéto ochladenie je však technicky nemožné a v prípade polovodičových detektorov ani nie je žiadúce. Znížená pracovná teplota detektorov aparátúry DOK-T bola dosiahnutá vložением tepelnej mnohovrstvovej izolácie medzi teleso radiátora s detektormi a box detektorového bloku a počas experimentu sa pohybovala v okolí -50°C .

DOK-1

Pre experiment INTERSHOCK so širšou medzinárodnou účasťou, ktorý bol zameraný predovšetkým na štúdium rázovej vlny (*bow-shock*) zemskej magnetosféry, bol na ÚEF vyvinutý a realizovaný spektrometer energetických častíc DOK-1. Tento prístroj už obsahoval 6 detektorov (3 páry), pričom každý pár obsahoval jeden elektrónový a jeden iónový detektor. Zlepšené odlíšenie elektrónovej a iónovej zložky toku častíc už zabezpečovali nielen penetračné fólie na elektrónových detektoroch, ale aj deflekčné magnetické filtre na iónových detektoroch, ktoré odkláňali ľahké elektróny mimo zorného poľa detektora, avšak trajektóriu ťažších iónov ovplyvňovali len v zanedbateľnej miere. Filtre využívali silné permanentné magnety na báze samárium-kobaltu s príslušným feromagnetickým obvodom. Každý detektorový pár mal inú priestorovú orientáciu a s využitím rotácie použitej kozmickej sondy PROGNOZ-10 bolo zabezpečené prirodzené „skanovanie“ okolitého priestoru a tým aj záznam uhlovej distribúcie toku energetických častíc. Vďaka heliocentrickej orientácii sondy PROGNOZ-10, aj prístroj DOK-1, inštalovaný na jej tieňovej strane, mohol využívať pasívne chladenie detektorov, čím bol dosiahnutý dolný energetický prah 10keV. Konštrukcia prístroja bola už kompaktnjšia, blok detektorov a blok elektroniky boli spojené do jedného celku – avšak účinná tepelná izolácia medzi týmito blokmi zabezpečila podstatne nižšiu pracovnú teplotu detektorovej časti, zatiaľ čo blok elektroniky bol „vyhrievaný“ dobrým tepelným

kontaktem s telesom družice. Daňou za toto dobré teplotné oddelenie bolo nedokonalé elektrické uzemnenie detektorovej časti, čo sa pri testoch elektromagnetickej kompatibility v komplexe družice prejavilo prenikaním rušivých signálov z telemetrických vysieláčov do vysokocitlivých predzosilňovačov prístroja. Potlačenie tohto nežiadúceho efektu bolo zabezpečené inštaláciou tieniacej mriežky, ktorá z piatich strán obklopuje



*Prístroj **DOK-1** so šiestimi polovodičovými detektormi priniesol zaujímavé vedecké dáta o rázovej vlně zemskej magnetosféry v rámci projektu INTERSHOCK. Do kozmu odštartoval v roku 1985 na palube sondy PROGNOZ-10.*

detektorovú časť a je dobre elektricky prepojená s blokom elektroniky a kostrou družice. DOK-1 úspešne pracoval na palube sondy PROGNOZ-10 po celú dobu jej života (7 mesiacov) a poskytol veľké množstvo cenných vedeckých údajov.

SPE-1

Ďalším kozmickým projektom so širokou medzinárodnou účasťou, bol experiment ACTIVE (IK-24). Vynesenie asi tisíc kilogramovej družice typu AUOS-Z spoločne so subsatelitom MAGION-2 na nižšiu excentrickú orbitu zabezpečila nosná raketa typu CYKLON z kozmodrómu Pleseck v septembri 1989. Cieľom experimentu ACTIVE bolo nielen pasívne monitorovanie mnohých geofyzikálnych procesov v okolí Zeme, ale aj aktívna stimulácia tohto prostredia elektromagnetickými a plazmovými generátormi – so synchronizovaným monitorovaním ich účinku na okolité kozmické prostredie celým radom ďalších vedeckých aparátúr. Medzi tieto monitorovacie systémy možno zaradiť aj aparatúru SPE-1 (*Spektrometer Protónov a Elektrónov*), vyvinutú a realizovanú na ÚEF. Táto aparatúra obsahovala takisto šesť párov polovodičových detektorov, uhlová orientácia každého detekčného páru bola iná. Družica IK-24 bola orientovaná geocentricky (stabilizácia gravitačným dipólom), čo neumožnilo využiť osvedčený princíp pasívneho chladenia

detektorov prístroja SPE-1. Preto boli detektory chladené aktívne - pomocou šiestich Peltierových článkov, ktoré prečerpávali teplo z detektorov na kostru prístroja. Na chladenie bol pridelený výkon 3W, čo umožnilo vo vákuu schladiť detektory asi o 40°C voči bloku elektroniky. Analyzátoři prístroja SPE-1 zaznamenávali v závislosti od zvoleného operačného módu energetické spektrá nabitých častíc do 5, 15, alebo 31 energetických kanálov. Prístroj SPE-1 pracoval veľmi úspešne po celú dobu života družice (5 rokov) a poskytol množstvo



*Spektrometer **SPE-1** so šiestimi detektormi chladenými Peltierovými článkami sa podieľal na monitorovaní časticových tokov v rámci projektu ACTIVE a na orbite spoľahlivo pracoval po dobu 5 rokov*

zaujímavých vedeckých dát, ktorých databáza je aj dnes často používaná pri fyzikálnych analýzach.

Ďalší, len málo modifikovaný exemplár tohto prístroja pod označením SPE-1M bol inštalovaný na vedecko-výskumný modul PRIRODA a nákladnou kozmickou loďou PROGRESS transportovaný v roku 1996 na orbitálny komplex MIR. Tento projekt bol na ruskej strane koordinovaný Inštitútom medicínsko-biologických problémov v Moskve, pričom z nie celkom známych príčin neboli konštruktéri prístroja prizvaní k inštalácii a predletovým testom svojho prístroja na module PRIRODA. Pravdepodobne tento neštandardný postup znemožnil včas odhaliť nekorektnú dátovú komunikáciu prístroja s telemetrickým systémom komplexu MIR. Dôsledkom je nekonzistentnosť registrovaných vedeckých dát, ktoré sa v súčasnosti nepoužívajú.

DOK-S

Charakteristickou črtou družicových meraní je principiálna nejednoznačnosť meraných fyzikálnych veličín, spôsobená pohybom družice po jej trajektórii (napr. 7.9km/s na nízkej orbite Zeme). Registrované časové variácie v toku častíc takto odzrkadľujú nielen ich časovú, ale aj priestorovú štruktúrovanosť. Odlíšenie časovej a priestorovej štruktúry tokov energetických častíc teda nie je principiálne možné pomocou meraní s použitím len jediného satelitu, ale sú potrebné

korelované merania viacerými satelitmi. Za týmto účelom sa často realizuje vzájomná výmena vedeckých dát medzi nezávislými experimentmi, alebo sa realizujú experimenty viac-satelitové.

Medzi merania tohto druhu s účasťou ÚEF-SAV patria experimenty ACTIVE, APEX, INTERBALL-X a INTERBALL-A v ktorých hlavnú družicu zakaždým sprevádzal mikrosatelit typu MAGION. Mikrosatelit bol vynášaný na obežnú dráhu tým istým kozmickým nosičom spoločne s hlavným satelitom, preto bol tiež označovaný ako „subsatelit“. K jeho oddeleniu od hlavného



*Spektrometer **DOK-S** bol vyvinutý v úzkej spolupráci s Katedrou rádioelektroniky EF-VŠT (terajšia KEMT-FEI-TU) v Košiciach. Štyri exempláre tohto prístroja postupne štartovali do vesmíru na palubách mikrosatelitov typu MAGION. Posledný z nich ešte aj v súčasnosti pracuje na mikrosatelite MAGION-5*

satelitu došlo na základe pozemného povelu až po určitej dobe, keď parametre orbity už boli stabilizované a hlavná družica normálne komunikovala s pozemným riadiacim strediskom. Pretože vektor oddeľovacieho impulzu bol orientovaný v smere trajektórie, subsatelit sa pohyboval prakticky po tej istej orbite, avšak jeho vzdialenosť od hlavného satelitu sa postupne zväčšovala, čím boli dosiahnuté dvojbodové merania relevantných fyzikálnych veličín.

Na monitorovanie toku častíc na palube mikrosatelitov typu MAGION bol v tesnej spolupráci ÚEF-SAV a KR-EF-VŠT vyvinutý malý spektrometer DOK-S. Prístroj obsahuje dva páry detektorov, jeden pár je orientovaný rovnobežne s hlavnou osou mikrosatelitu, druhý je k osi orientovaný kolmo. Prístroj DOK-S je osadený mikroprocesorom 80C85, ktorý simultánne obsluhuje registračnú elektroniku a zabezpečuje aj obojsmerný dátový / povelový styk s telemetrickým systémom mikrosatelitu MAGION. Súčasťou prístroja je aj jedna zásuvná doska elektroniky zabudovaná vnútri mikrosatelitu. K prvému „nasadeniu“ prístroja DOK-S došlo na palube mikrosatelitu MAGION-2 v rámci experimentu ACTIVE (1989), a ešte ďalšie 3 exempláre sa postupne dostali do kozmu na mikrosatelitoch MAGION-3, 4 a 5.

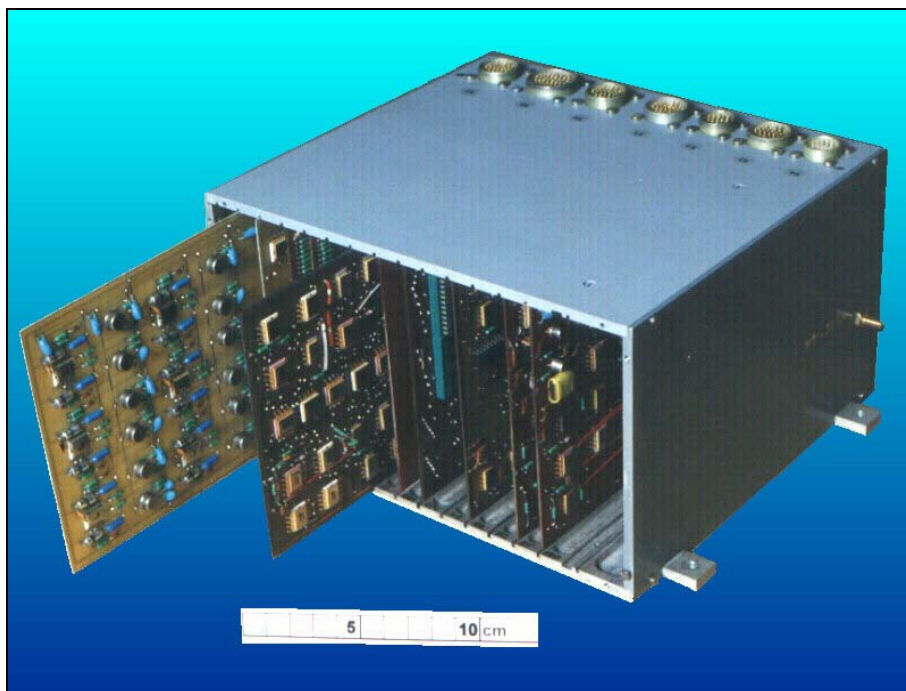
SONG-E

Aparatúra SONG (Solar Neutron and Gamma-ray spectrometer) bola vyvinutá v rámci spolupráce ÚEF-SAV s Ústavom jadrovej fyziky Moskovskej štátnej univerzity (NIIJAF-MGU) pre projekt CORONAS-I, pričom jej detektorovú časť SONG-D realizoval NIIJAF a jej elektronickú časť SONG-E vyvinul a realizoval ÚEF.

Prístroj SONG-E zabezpečoval registráciu

širokej škály impulzných signálov z detektorovej časti, kompresiu nameraných dát a formátovanie dátových blokov pre dva rôzne telemetrické systémy družice typu AUOS-Z. Bol osadený tromi mikroprocesormi typu 80C85, z ktorých dva zabezpečovali registráciu a tretí zabezpečoval spracovanie dát a styk s telemetrickými systémami. Aparatúra SONG štartovala v komplexe družice CORONAS-I v roku 1994 a poskytla množstvo veľmi cenných vedeckých dát o distribúcii neutrónového a gama žiarenia v okolí Zeme, ktoré sú priebežne spracovávané a fyzikálne interpretované aj v súčasnosti.

Ďalší variant tohto prístroja bol na ÚEF realizovaný pod typovým označením SONG-EM a v súčasnosti je pripravovaný pre veľmi príbuzný experiment CORONAS-F. Tento variant má o jeden telemetrický výstup menej a taktiež jeho registračné procesory boli nahradené rýchlejšou hardverovou registračnou elektronikou. V súčasnosti prebiehajú jeho pozemné testy spoločne s detektorovou časťou na pôde NIIJAF-MGU, vynesenie na orbitu je plánované koncom roku 2000.

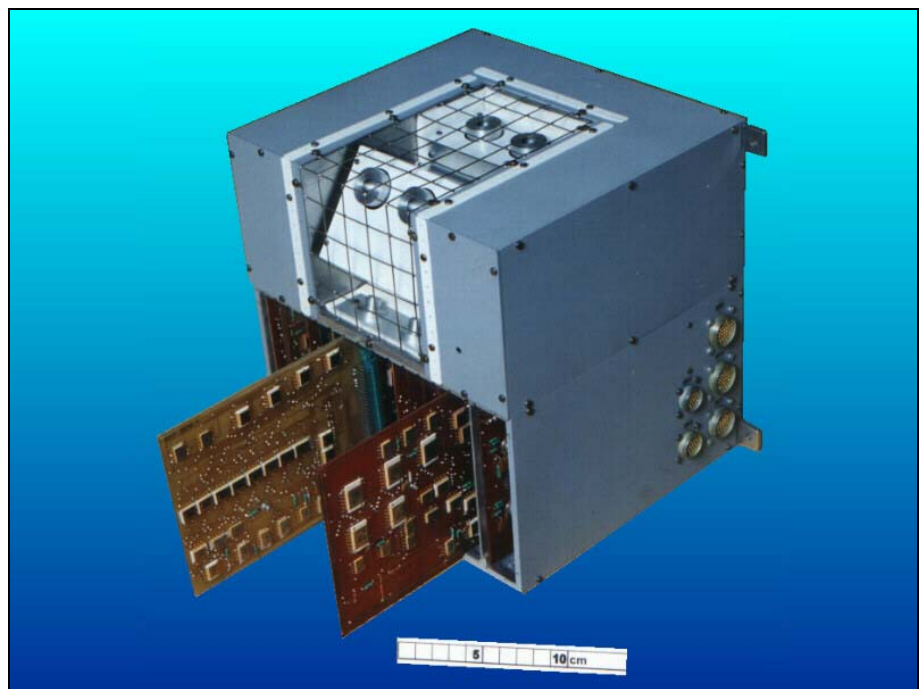


Blok elektroniky SONG-E zabezpečoval spracovanie vedeckých dát pri registrácii slnečných neutrónov a gama častíc v kozmickom experimente CORONAS-I. Inovovaný exemplár tohto prístroja je v súčasnosti pod označením SONG-EM pripravovaný na štart do kozmu v rámci príbuzného experimentu CORONAS-F

DOK-2

Aparatúra DOK-2 bola vyvinutá a realizovaná na pôde ÚEF v spolupráci s Demokritovou univerzitou v Xanthi (Grécko) a Ústavom kozmických výskumov v Moskve. Na základe jej komplexnosti, množstva a kvality získaných vedeckých dát, ju možno označiť za „vlajkovú loď“ aparátúry OKF. DOK-2 štartoval do kozmu dvakrát a to v rámci prestížneho projektu INTERBALL so širokou medzinárodnou účasťou, ktorého cieľom bolo štvorbodové korelované meranie v zemskej magnetosfére. Experiment zabezpečili dva hlavné satelity typu PROGNOZ a to INTERBALL-X (chvostová sonda), INTERBALL-A (aurorálna sonda) a k nim príslušné, už spomenuté subsatelity MAGION-4 a MAGION-5. Vypustenie týchto štyroch satelitov na excentrické orbity zabezpečili dva kozmické nosiče typu MOLNIA-M z kozmodrómu Pleseck.

Medzi významnejšie špecifiká aparátúry DOK-2 patria dva páry pasívne chladených kremíkových detektorov, pričom jeden pár je permanentne orientovaný v smere od Slnka (t.j. 180°), zatiaľ čo druhý pár mechanicky skanuje priestor od smeru 180° až po uhol 45° k Slnku. Tento pohyb je



„Vlajková loď“ spektrometrov kozmických častíc z ÚEF s označením **DOK-2** priniesla množstvo zaujímavých vedeckých dát z aurorálnych a chvostových oblastí zemskej magnetosféry. Dva exempláre tejto aparátúry štartovali do kozmu na palubách hlavných satelitov projektu INTERBALL v rokoch 1995 a 1996. Jeden z nich je ešte stále funkčný a poskytuje cenné vedecké dáta.

synchronizovaný s rotáciou kozmickej sondy a počas jednej otáčky družice (perióda 120 sekúnd) vykoná šesť úplných kyvov. Takto sa získava informácia o uhlovej distribúcii časticového toku s pomerne vysokým rozlíšením. Pohyb skanovacích detektorov aparátúry DOK-2 je programovo riadený z jej mikropočítača a pomocou pozemných povelov možno tieto detektory taktiež zastaviť na rozličných pevných uhloch od Slnka. Detektory sa môžu natočiť až na uhol 15° k Slnku, v tejto polohe sa však už nachádza rádioaktívny žiarič ^{109}Cd , ktorý generuje monoenergetické elektróny s energiou 84 keV a tým zabezpečuje fyzikálnu letovú kalibráciu detektorov. Amplitúdové analyzátory aparátúry zabezpečujú 56-kanálovú energetickú analýzu elektrónov v rozsahu 20 keV až 600 keV a

57-kanálovú analýzu iónov v energetickom rozsahu 20keV až 1,5 MeV. Ďalším zaujímavým špecifikom sú určité prvky umelej inteligencie zakomponované do softvéru aparatury, ktoré umožňujú na základe vyhodnotenia niektorých registrovaných parametrov a momentálnej dispozície telemetrickej kvóty rozhodnúť o spôsobe a hustote záznamu vedeckej informácie. Takto môže DOK-2 automaticky, na základe vlastného rozhodnutia s vyšším rozlíšením zaznamenať niektoré fyzikálne zaujímavé fenomény, napr. zmenu niektorého parametra toku častíc, prevyšujúcu definovaný prah. Pri tomto prechode do režimu zvýšenej informatívnosti sa do výstupnej informácie zaznamená aj predhistória tohto prechodového procesu asi 5 sekúnd dozadu, pretože táto informácia je ešte k dispozícii vďaka cyklickému prepisu vyhradenej oblasti RAM. Mikropočítač aparatury DOK-2 využíva kozmicky kvalifikovaný procesor typu 80C85, softvér je lokalizovaný v radiačne odolnej pamäti ROM.

Obe aparatury DOK-2 priniesli veľké množstvo kvalitných vedeckých dát o štruktúre a procesoch prebiehajúcich v aurorálnej a chvostovej časti zemskej magnetosféry, čo potvrdili aj porovnávacie štúdie s dátami obdobných aparatur na japonskej družici GEOTAIL a americkej POLAR. V širšom kontexte sa prezentáciou výsledkov získaných projektom INTERBALL, ako aj uvedenými porovnávacími štúdiami zaoberala medzinárodná konferencia s účasťou špičkových pracovísk svetového kozmofyzikálneho výskumu a s podporou NATO, organizovaná na ÚEF-SAV v septembri 1998 pod pracovným názvom „*NATO Advanced research workshop: Coordinated studies of the Solar wind – Magnetosphere – Ionosphere interaction, INTERBALL observations*”.

SLED-2

V roku 1989 bol ÚEF prizvaný k účasti na veľmi prestížnej, široko internacionalizovanej (22 zúčastnených krajín) misii k planéte Mars, ktorej pôvodný názov bol MARS-94. Kvôli omeškaniu „štartovacieho okna“ v roku 1994 (na Mars možno optimálne štartovať len v určitej pozícii voči Zemi) sa jej štart posunul o 2 roky, čím sa názov misie zmenil na MARS-96. Vysoké nároky na aplikovanú techniku nebolo možné zabezpečiť ani technicky, ani finančne priamo na pôde ÚEF, preto bolo nutné vstúpiť do širšej medzinárodnej spolupráce už aj v rámci prípravy jednej aparatury. Takto sa zrodila aparatura SLED-2 (*SoLar wind Energetic particle Detector*), ktorej celkovú mechanickú konštrukciu, nízkošumovú analógovú elektroniku, obvody klasifikácie a A/D konverzie, DC/DC konvertor, systémovú zbernicu a obvody automatickej termoregulácie zabezpečil ÚEF-SAV, polovodičové teleskopické detekčné systémy zabezpečil Max-Planck Institut für Aeronomie v Lindau (Nemecko), mikropočítač s interfejsami na detektorovú časť a na telemetrický systém sondy zabezpečila spoločnosť Space Technology Ireland v Maynooth (Írsko), a o softverové vybavenie sa

podelili Astronomický ústav AVČR v Prahe a Ústav kozmických výskumov v Moskve. Napokon celková integrácia aparatury a jej pozemné testy prebiehali na pôde KFKI v Budapešti.

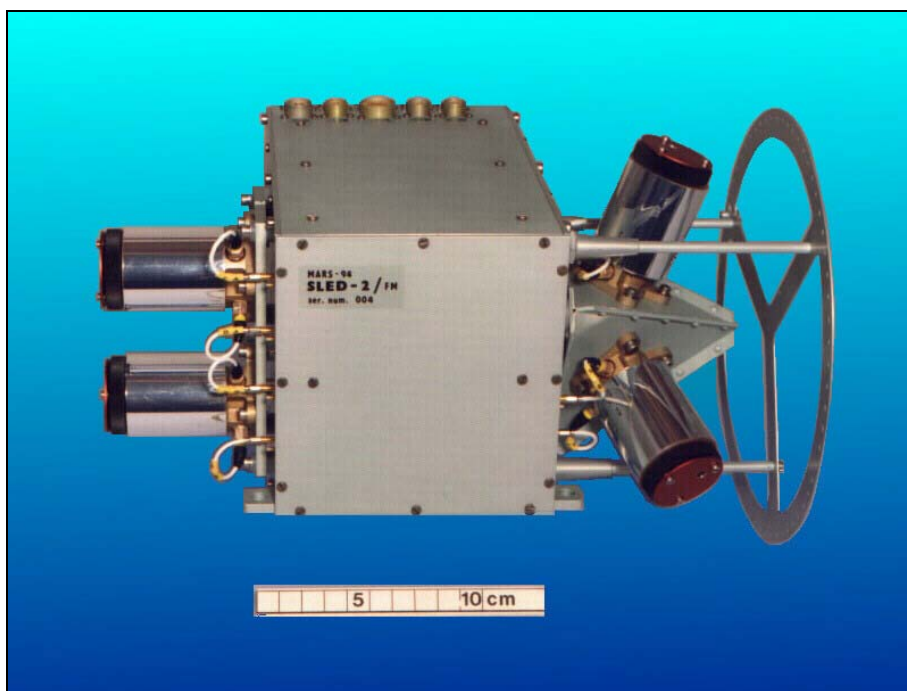
Jednou z hlavných úloh experimentu SLED-2 bol záznam uhlovej distribúcie iónov cez celý priestorový uhol 4π jednak na približovacej trajektórii Zem – Mars, predovšetkým však na orbite Marsu, kde anizotropné charakteristiky tokov nabitých častíc v korelácii s meraniami magnetického poľa môžu vypovedať o prítomnosti magneticky zachytených častíc a teda o existencii magnetosféry tejto planéty. Mars má totiž podstatne slabšie magnetické pole a teda aj celkom odlišnú magnetosféru ako Zem. Absencia silnejšieho magnetického poľa má pre túto planétu závažné dôsledky, o.i. je pravdepodobne zodpovedná aj za to, že Mars pod tlakom slnečného vetra na atmosféru stratil v minulosti vodu (o jej niekdajšej prítomnosti svedčia známe mart'anské kanály).

Závažným špecifikom pre záznam uhlovej distribúcie častíc aparaturou SLED-2 bola trojosová heliocentrická stabilizácia sondy MARS-96, pri ktorej je jedna os permanentne orientovaná na Slnko, ďalšia os je fixovaná v rovine ekliptiky. Stabilizáciu kontroluje jeden slnečný a jeden hviezdny senzor, orientovaný na hviezdu α_{Car} -CANOPUS. Keďže takto orientovaná sonda nerotuje a mechanické skanovanie bolo vylúčené kvôli nízkemu energetickému limitu, bol navrhnutý nepohyblivý senzorový systém pozostávajúci zo štyroch identických dvojdetektorových teleskopov v tetraedrickom

usporiadaní (ich osi sú orientované kolmo na steny pravidelného tetraédra). Takáto orientácia zabezpečuje registráciu štyroch rôznych vzoriek intenzity časticového toku, rovnomerne rozmiestnených v plnom priestorovom uhle.

Kvôli svojmu tetraédrickému zornému poľu bol SLED-2 umiestnený až na konci slnečného panela tak,

aby voľne „videl“ do všetkých štyroch smerov. Pretože počítačové simulácie odhalili pre takúto



Spektrometer SLED-2 s desiatimi polovodičovými detektormi bol s významným podielom ÚEF vyvinutý v širšej medzinárodnej spolupráci s Írskom, Nemeckom, Ruskom, Českom a Maďarskom. K planéte Mars odštartoval v novembri 1996 v rámci misie MARS-96. Na veľkú škodu slovenskej vedy, misia zlyhala kvôli poruche raketového motora.

lokalizáciu nebezpečenstvo podchladenia na orbite Marsu, bola aparátúra vybavená aj systémom automatickej termoregulácie, ktorý sa mal inicializovať pri poklese teploty bloku elektroniky už pod -10°C .

Tri iónové teleskopy, vybavené SmCo deflekčnými magnetmi, boli umiestnené na stenách tetraédrickej pyramídy na slnečnej strane. Pred priamym slnečným svetlom a teplom ich chránil kruhový „slnečník“ z hrubej termovákuovej izolácie, ktorý však bol mimo zorného poľa týchto teleskopov (jeho nosnú konštrukciu vidno na snímke). Štvrtý, identický iónový teleskop bol umiestnený na plochej platforme z opačnej strany bloku (180° od Slnka). Paralelne s ním bol fixovaný jediný elektrónový teleskop s penetračným filtrom s polyesterovou fóliou hrúbky $3\mu\text{m}$. Každý z piatich teleskopických systémov obsahoval dva moderné iónovo-implantované detektory typu PIPS. Pasívne chladenie detektorov bolo zabezpečené zvýšeným tepelným odporom medzi pyramídou, plochou platformou a blokom elektroniky. Povrch všetkých teleskopov bol pokrytý špeciálnou fóliou (tzv. *second-mirror surface*), ktorá vykazuje výrazne odlišné koeficienty tepelnej absorpcie a emisie (u normálnych povrchov sú približne rovnaké). Na valcových častiach teleskopov boli fixované posuvné prstence (nie sú na snímke), ktoré upevňovali celkový tepelný štít aparátúry a ich poloha definovala odkrytý tepelno-radiačný povrch aparátúry. Tieto opatrenia definovali spoločne s jednotkou elektronickej termoregulácie optimálny tepelný režim aparátúry od počiatkovej vzdialenosti 150 miliónov km od Slnka (orbita Zeme) až po vzdialenosť 250 miliónov km od Slnka (afélium orbity Marsu), pričom k podchladeniu elektroniky nemalo dôjsť ani na nočnej strane tejto planéty.

Vedecká informácia aparátúry SLED-2 obsahovala paralelne registrované integrálne intenzity časticových tokov zo všetkých piatich teleskopov, koincidenčné signály a signály pozadia, ako aj informáciu z 12-kanálového amplitúdového analyzátora. Technická informácia obsahovala všetky pracovné napätia a tri teploty - tetraédrickej pyramídy, plochej platformy a bloku elektroniky. Mikropočítač aparátúry bol osadený radiačne odolným procesorom NSC800, ktorý pracoval pod multi-taskovým operačným systémom ZOS. Aparátúra SLED-2 absolvovala všetky veľmi náročné pozemné kvalifikačné testy a splnila všetky ich požiadavky na výbornú.

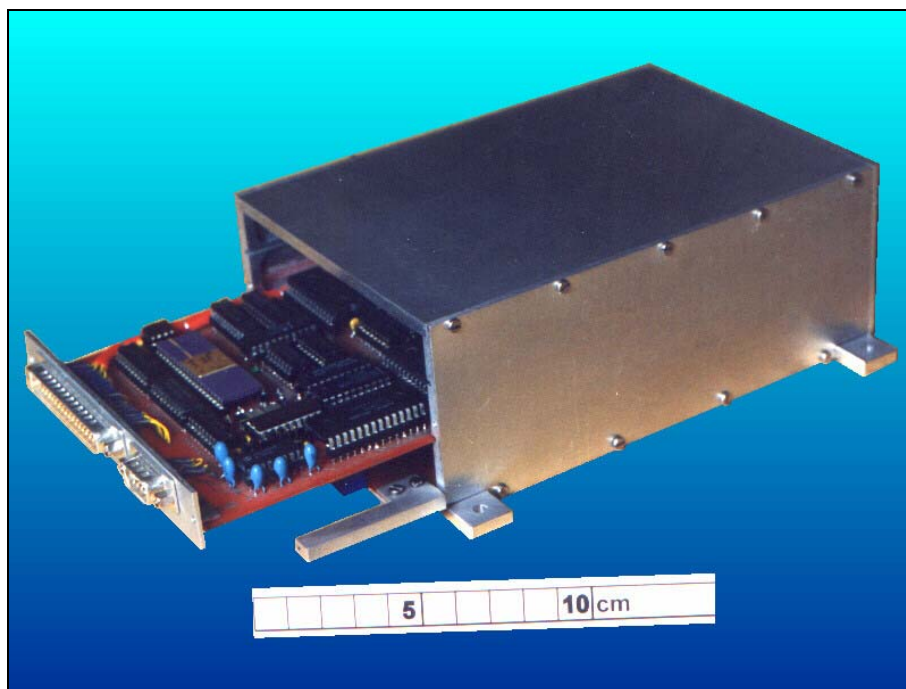
Štart misie MARS-96 sa uskutočnil 16.11.1996 z kozmodrómu Bajkonur a zabezpečoval ho osvedčený trojstupňový kozmický nosič typu PROTON-K, ktorého kapacita stačila na vynesenie pomerne ťažkej sondy na nízku kruhovú orbitu Zeme. Ďalší impulz, potrebný na zmenu kruhovej dráhy na excentrickú s vysokým apogeom mal zabezpečiť prídavný raketový modul D2, špeciálne vyvinutý na tento účel. A napokon posledný impulz, potrebný na prekonanie druhej kozmickej rýchlosti a navedenie na medziplanetárnu trajektóriu k Marsu, mal zabezpečiť vlastný raketový motor sondy. Kozmický nosič PROTON-K spoľahlivo splnil všetky očakávania a vyniesol sondu na

požadovanú kruhovú orbitu vo výške 160 km, pričom aj prídavná jednotka D2 zažehla svoj motor presne podľa scenára, kontrolovaného počítačmi pozemných sledovacích staníc. Ďalej scenár vyžadoval vypnutie ťahu D2 a ďalší povel na jeho zapálenia už zabezpečoval počítač samotnej sondy, pretože v dobe požadovaného druhého zážehu sa sonda nachádzala mimo dosahu sledovacích staníc. Blok D2 však zlyhal a už sa ho žiadnym povelom nepodarilo naštartovať. Nasledovali niektoré zúfalé pokusy o záchranu misie, čo však bolo bez tak potrebného ťahu D-dvojky fyzikálne nemožné. Na príkaz z riadiaceho strediska nasledovalo odpojenie modulu D2 a zapálenie hlavného motora samotnej sondy. Tá však nemala dostatok paliva na dosiahnutie druhej kozmickej rýchlosti a udelený impulz iba zmenil jej dráhu na excentrickú s perigeom vo výške iba 87 km. Prvý prelet týmto príliš nízkym perigeom v atmosfére Zeme aerodynamicky a teplotne poškodil jej komunikačný systém, čím sa s ňou stratilo spojenie. Pokiaľ by sa toto spojenie zachovalo, snáď ešte bolo možné sondu naviesť na stabilnú kruhovú dráhu, kde mohla počkať napr. na prípadnú opravu s pomocou amerického raketoplánu, alebo aspoň nejaký čas slúžiť pri výskume Zeme. Pri ďalšom prelete perigeom sa však medziplanetárna sonda MARS-96 v hodnote vyše 1 miliardy dolárov zrútila do južného Pacifiku kdesi medzi Veľkonočným ostrovom a Chile. A s ňou aj SLED-2...

EPD-DPU

Projekt

stredoeurópskeho satelitu CESAR (*Central European Satellite for Advanced Research*) vznikol v rámci tzv. Stredoeurópskej iniciatívy, pričom ťarchu hlavného koordinátora a realizátora tejto družice na seba prevzalo Taliansko a to hlavne talianska kozmická agentúra ASI v Ríme a



Blok elektroniky EPD-DPU (Data processing unit) vyvinutý pre stredoeurópsky satelit CESAR, je osadený radiačne odolným procesorom Harris HS-80C86RH a má zabezpečiť spracovanie a transfer vedeckých dát z časticového experimentu EPD. Štart satelitu CESAR sa zatiaľ neuskutočnil

spoločnosť ALENIA-SPAZIO v Turíne.

Účasť na tomto projekte prijal aj ÚEF-SAV, ktorý sa zaviazal pre tento projekt vyvinúť aparatúru EPD (*Energetic Particle Detector*). Zvládnutie finančných a technických problémov, spojených s touto aparatúrou, opäť viedlo k spolupráci so „silnejším“ partnerom, ktorým sa v tomto prípade stala spoločnosť AEROSPACE Inc. (USA), pričom táto spoločnosť mala dodať detektorovú časť EPD-A a ÚEF sa zaviazal vyvinúť a realizovať blok elektroniky EPD-DPU (*Data Processing Unit*). Zatiaľ čiastočne realizovaná jednotka EPD-DPU obsahuje mikropočítač osadený radiačne odolným procesorom HS-80C86RH, príslušné interfejsy na detektorovú časť a na telemetrický systém satelitu CESAR, ako aj DC-DC konvertor na napájanie celej aparatúry EPD. Napriek značnému počiatočnému nasadeniu, experiment CESAR v dnešných dňoch napreduje len veľmi pomaly a významnejšie ho neoživilo ani nedávne presmerovanie hlavnej koordinácie z Talianska na Európsku kozmickú agentúru ESA.

MEP-1

Zatiaľ posledným dokončeným kozmickým prístrojom vývojovo-realizačnej skupiny OKF je programovateľný časticový spektrometer MEP-1 (*Monitor of Energetic Particles*), vyvinutý v spolupráci s Univerzitou v Campinas (Brazília), Ústavom fyziky Zeme a Ústavom zemského magnetizmu a ionosféry Ruskej akadémie vied. MEP-1 bol vyvinutý pre prácu na palube mikrosatelitu COMPASS.



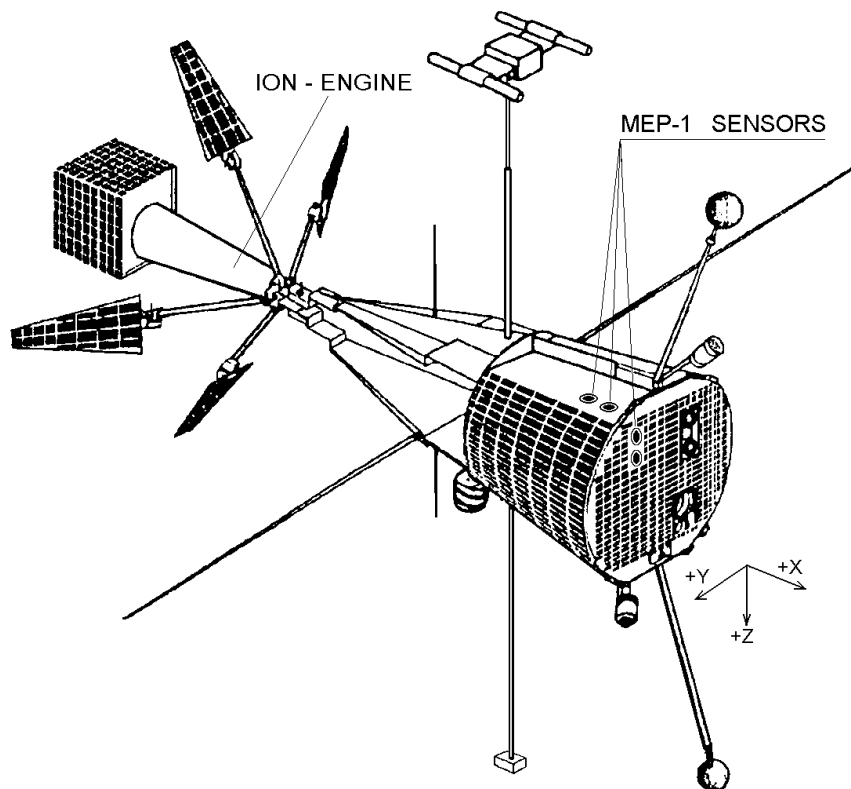
„In-flight“ programovateľný spektrometer **MEP-1** bol špeciálne vyvinutý pre prácu na palube mikrosatelitu COMPASS, kde by mal zabezpečovať monitoring ionosférických časticových tokov. Tie sú totiž „podozrievané“, že spolu s niektorými ďalšími geofyzikálnymi fenoménami by mohli priniesť včasnú informáciu o blížiacom sa zemetrasení.

Vedecké ciele projektu COMPASS zahŕňajú predovšetkým štúdium korelácie medzi seizmickými litosférickými procesmi a niektorými vytypovanými geofyzikálnymi fenoménami, pozorovateľnými v ionosférických výškach, t.j. z nízkej orbity Zeme. Medzi uvedené fenomény patria aj variácie tokov nabitých energetických častíc. Aj keď celkom evidentné dôkazy zatiaľ neboli predložené, viaceré analýzy dát z nízkoorbitálnych družíc poukázali na prítomnosť anomálnych disturbancií ionosférickej plazmy a časticových tokov už niekoľko hodín pred rozsiahlymi následnými zemetraseniami. Zatiaľ hypotetickým mechanizmom, ktorý by mohol byť zodpovedný za uvedené javy, je vyžarovanie veľmi dlhých vln piezoelektrického pôvodu, keďže zemetraseniam spravidla predchádza značný nárast materiálového pnútia vo väčších hĺbkach zemskej kôry. Zemská magnetosféra, ako vodivý objekt dostatočne veľkých rozmerov, môže interagovať aj s veľmi dlhými elektromagnetickými

vlnami a teda môže byť pre ne vhodnou „anténou“. Sekundárnym efektom by teda mohli byť aj detekovateľné variácie časticových tokov, keďže tieto sú vlnovými procesmi v magnetosfére modulované. Uvedené skutočnosti poskytujú pre budúcnosť určitú nádej využiť nepretržité monitorovanie a „on-line“ vyhodnocovanie ionosférických

časticových tokov ako jeden z citlivých prekursorov zemetrasení, ktorý by sa mohol v

budúcnosti stať súčasťou globálneho systému včasnej výstrahy. Ciele experimentu a špecifiká vlastné mikrosatelitu COMPASS vyústili do návrhu hardverovo jednoduchej, z hľadiska obsluhy a spracovania dát veľmi transparentnej aparatúry, ktorej dominantnou črtou je možnosť adaptability



Náčrt mikrosatelitu COMPASS so spektrometrom MEP-1 na palube. Jeho štart na kruhovú orbitu vo výške asi 350km bol už viackrát odložený pre nedostatok finančných prostriedkov, potrebných na dokončenie tohto satelitu. Pokiaľ sa potvrdí použiteľnosť ionosférického monitoringu na včasnú detekciu (dúfajme že aj na lokalizáciu) blížiaceho sa zemetrasenia, viacero podobných satelitov by malo v budúcnosti nepretržite križovať ionosféru v rámci globálneho systému včasnej výstrahy.

resp. fokusácie jej činnosti na aktuálne fyzikálne zámery experimentátora a to aj počas celej doby trvania kozmického experimentu. Takto môžu byť jej nové pracovné režimy definované a naprogramované zo Zeme napríklad na základe priebežnej analýzy už nameraných dát. Okamžitá činnosť aparatury MEP-1 je úplne definovaná relatívne malým konfiguračným súborom DLT o dĺžke 128 bajtov, ktorý definuje dynamické prepínanie energetických prahov amplitúdových analyzátorov pre jeden celý merací cyklus. Až 128 takýchto DLT súborov si aparatura môže vyniesť na orbitu v pamäti ROM už pri štarte. Ďalších 127 DLT súborov je lokalizovaných v pamäti EEPROM a možno ich programovať počas práce na orbite cez vzostupnú (*uplink*) povelovú linku zo Zeme. Už raz definovaný DLT súbor možno aktivovať jednoduchým povelom zo Zeme, alebo z palubného počítača satelitu podľa predprogramovaného scenára.

Mikrosatelit COMPASS o hmotnosti 70kg mal byť vynesенý na nízku kruhovú orbitu vo výške 350-400 km pomocou upravenej balistickej rakety, pričom štart sa mal uskutočniť z atómovej ponorky v Barentsovom mori ešte v roku 1997. Odvtedy došlo z ruskej strany už k viacerým odkladom a zmenám scenára technického zabezpečenia experimentu, pričom dátum štartu je zatiaľ stále neznámy. Aj keď je MEP-1 už od r. 1997 dokončený a skalibrovaný, jeho vyslaniu do kozmu zatiaľ bránia chronické problémy spojené s financovaním vývoja a realizácie samotného mikrosatelitu COMPASS. Je skutočne veľmi smutné, že sa zatiaľ nenašli prostriedky na realizáciu jedného z najušľachtilejších zámerov vedy na poli mierového využitia kozmu. Aj keď záruku na úspech zatiaľ nemožno poskytnúť, už len samotná nádej na predpovedanie zemetrasení, ktoré ročne zabíjajú desaťtisíce ľudí na celej Zemi, by určite stála za to.

Záverom

Možno by sa nadpis tohto článku mohol začínať aj slovami „Vzostupy a pády ...”, pretože nielen úspechy vždy korunovali kozmický program ÚEF-SAV. Riziká spojené s kozmickým výskumom a jeho technickým zabezpečením však nikdy nebude možné celkom vylúčiť. Vzhľadom na značný počet realizovaných experimentov však už možno hovoriť o určitej štatistike – a tá je v konečnom dôsledku celkom dobrá. Nie všetky neúspechy sú technického charakteru, niektoré možno skôr označiť za organizačno – politické. Medzi takéto patrí napr. neúspech presadiť návrh novej aparatury **SLED-3** (s Írskom a Nemeckom) na medziplanetárnu misiu Európskej kozmickej agentúry ESA nazvanú MARS-EXPRESS-2003. Okrem určitého „odklonu” od vedeckých cieľov tejto misie, ktoré sú zameraná hlavne na výskum atmosféry a povrchu Marsu, sa však na tomto neúspechu pravdepodobne podpísala aj skutočnosť, že Slovensko zatiaľ nie je oficiálne asociované pri ESA. Podobné problémy sú pravdepodobné aj pri presadzovaní budúcich projektov, pokiaľ sa Slovensko včas nezapojí do existujúcich európskych štruktúr kozmického výskumu – rovnako, ako to už urobili

všetky susedné krajiny. Plány na budúce kozmické projekty s účasťou ÚEF samozrejme existujú, vzhľadom na tradičnú neurčitosť ich realizácie ich však zatiaľ nebudeme rozoberať.

Medzi ďalšie aktivity Oddelenia kozmickej fyziky ÚEF-SAV, ktoré sa už vymykajú z rámca tohto článku a zaslúžili by si samostatný priestor, patrí dlhoročný výskum jadrovej zložky kozmického žiarenia pomocou pasívnych detektorov – nukleárných emulzií, ktoré natrvalo zaznamenávajú stopy preletov energetických jadier cez materiál polymérovej emulzie. Expozíciu emulzií postupne zabezpečovalo sedem družíc typovej rady KOZMOS, počínajúc družicou INTERKOZMOS-6 (1972), expoziáciu zatiaľ posledného bloku zabezpečoval pre ÚEF slovenský kozmonaut Ivan BELLA v rámci projektu **SK-1 / DOZIMETRIA**, počas svojho pobytu na orbitálnej stanici MIR vo februári 1999 (zabezpečil pre ÚEF aj výmenu záznamových médií vedeckých dát v slovensko-ruskej časti aparatury SPRUT-6).

Ďalšie aktivity OKF súvisia s už spomenutým laboratóriom na nepretržité monitorovanie nukleónovej zložky kozmického žiarenia na Lomnickom štíte. Toto laboratórium, ktorého experimentálnu bázu t. č. tvorí tzv. neutrónový supermonitor, má za sebou dlhú tradíciu, siahajúcu až do štyridsiatych rokov nášho storočia a patrí do celosvetovej siete obdobných vysokohorských observatórií.

A napokon je tu predovšetkým samotná kozmická fyzika - veda, ktorá nestojí bokom, ale nad tým, integrálne spája všetky spomenuté aktivity, definuje vedecké ciele na základe poznaného či predpokladaného, objednáva vedecké prístroje požadovaných vlastností a zabezpečuje ich nasadenie v kozme aj na zemi, analyzuje výsledky vlastných experimentov a konfrontuje ich s cudzími, vizualizuje, interpretuje, publikuje... Je to zaujímavý svet...

■ *Ing. Ján BALÁŽ, PhD.*

Ústav experimentálnej fyziky SAV

Snímky: Autor