

30 let kosmofyzikálního výzkumu v Košicích

Karel Kudela

1. Úvod

7. srpna 1970 byla v tehdejší SSSR vypuštěna umělá družice Země Interkosmos-3 (IK-3), kterou se datují začátky kosmofyzikálního výzkumu na Ústavu experimentální fyziky (ÚEF SAV) v Košicích a na slovenských pracovištích vůbec. Šlo o první účast slovenských pracovišť na experimentálním výzkumu kosmu za hranicí atmosféry. Ústav se tehdy podílel na analýze dat získaných aparaturou PG-1 zkonstruovanou na MFF UK v Praze. Výzkumu na této družici a na sérii následujících podobně zaměřených družic se zúčastnila tři československá pracoviště, a to Geofyzikální ústav ČSAV, Astronomický ústav ČSAV a ÚEF SAV. V zahraničí kromě ruských kolegů (hlavně z Moskevské univerzity) to byli kolegové z Maďarska a Polska s nimiž jsme spolupracovali. Šlo o popis procesů, které vedou ke změnám toků energetických nabitých částic v zemské magnetosféře. Prof. Juraj Dubinský, první ředitel ÚEF SAV, zapojil košické pracoviště do programu Interkosmos. Měření toků zachycených částic pokračovalo na družicích IK-5 a IK-13. K hlavním výsledkům patřily charakteristiky toků částic „vysypávajících“ se z oblastí stabilního záchytu a příspěvek k pochopení významu interakcí částic a vlnění. Na tehdejší dobu šlo o zajímavé výsledky popisující např. délkové rozdělení toků kvazizachycených částic a z toho plynoucí zjištění o rychlosti jejich úhlové difuze. Množství dat, a to již z prvních elektronických částicových měření na družicích, vyžadovalo značné úsilí při jejich zpracování. Dnešní výpočetní technika je neporovnatelná s tehdejšími možnostmi. Zkoumání interakce jader kosmického záření s jádru emulze, které začalo na návratné družici IK-6, přineslo některé nové poznatky o jádro-jádrových srážkách při extrémních energiích. Ve zkratce uvedeme některé kosmické experimenty se spoluúčastí ÚEF SAV.



Obr. 1. Aparatura PG-1 vyvinutá na MFF UK v Praze pro IK-13. Měření byla využita např. pro studium krátkodobých variací toku částic v magnetosféře na malých výškách.

2. Vysokoenergetické neutrální emise ze Slunce

V polovině 70. let jsme se pokusili o první kosmické experimenty a to ve spolupráci s kolegy na tehdejší Katedře radioelektroniky Elektrotechnické fakulty VŠT (nyní

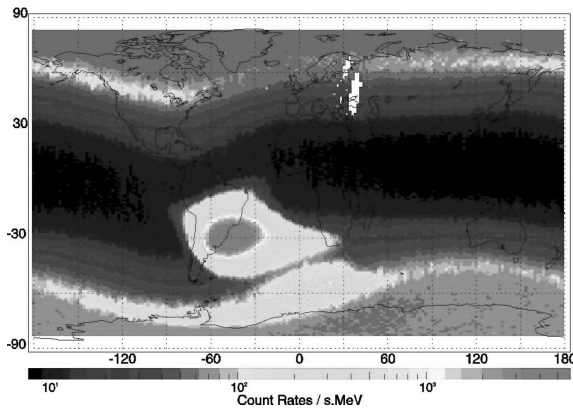
Fakulta elektrotechniky a informatiky TU) Košice. Prvním takovým experimentem byla balonová měření s označím BANAN v tehdejší SSSR. Šlo o odzkoušení metodiky detekce neutronů, která by se v určité modifikaci dala využít později na družicích. V roce 1975 vzniká na ÚEF SAV malá technická skupina (tehdy Oddělení kosmického záření, od roku 1980 má název Oddělení kosmické fyziky – OKF), která začala s návrhem, konstrukcí a testováním aparatur pro družice.

V 70. a 80. letech se rozvinuly práce analytické i experimentální. Významným byl hlavně experiment na družici Interkosmos-17, zaměřený na komplexní výzkum korpuskulární radiace různých typů a energií na nízké orbitě. Pracoviště se do něj zapojilo v širším rozsahu než předtím (neutrony, gama záření, elektrony a protony radiačních pásů), a to jednak vývojem elektronických částí aparatury SK-1 ale i analýzou měření aparatur na družici včetně SK-1. Byly získány hodnoty toků neutronů, gama záření a elektronů na nízké polární orbitě. Zájem se soustředil zejména na ty neutrony, které jsou jako produkty jaderných reakcí generovány v slunečních erupcích a jejichž vysokoenergetická část může bez rozpadu dojít k Zemi a tam být registrována. Neutrony na rozdíl od nabitých částic nejsou ovlivňovány meziplanetárním ani zemským magnetickým polem, a proto poskytují přímou informaci o vysokoenergetických procesech na slunečním povrchu prostřednictvím pozorování u Země. Sluneční neutrony na IK-17 zaznamenány nebyly, byla ale zjištěna závislost toků neutronů a gama záření tzv. zemského albeda (část sekundárního kosmického záření vznikajícího při dopadu primárních protonů, která následně uniká do vnějšího prostoru) na geomagnetické šířce.



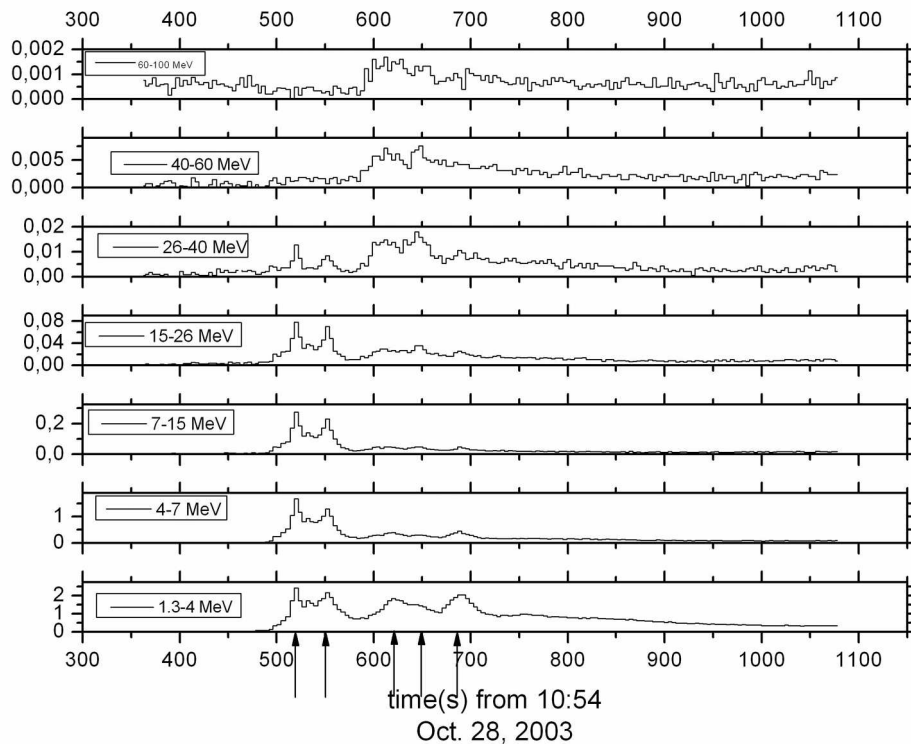
Obr. 2. Přístroj s označením SK-1. První přístroj, jehož část byla vyvinuta v Košicích a který měřil v kosmu neutrony a gama záření na nízké polární orbitě (IK-17). Detekční část byla vyvinuta ve Fyzikálně-technickém ústavu v Leningradě. Družice byla vypuštěna v září 1977.

Díky zvýšení statistické přesnosti měření neutronovým monitorem na Lomnickém štítě v prosinci 1981 (data jsou v reálném čase dostupná nyní na <http://neutronmonitor.ta3.sk>) byla první odezva od slunečních neutronů zaznamenána o něco později v pozemních pozorováních, a to z erupce 3. 6. 1982, kdy byla potvrzena třemi měřeními ve střední Evropě (Jungfraujoch, Lomnický štít a Řím). Problematika toků neutronů a gama záření v blízkém okolí Země je stále aktuální. Měření na družici CORONAS-I v r. 1994 (přístrojem SONG, jehož elektronická část byla vyvinuta na ÚEF SAV), dovolila popsat velmi podrobně toky těchto částic jakož i jejich časové variace spojené s magnetickou aktivitou ve výšce 500 km a získat jejich podrobné mapy.



Obr. 3. Podrobná mapa toku gama záření na výšce 500 km (Dr. Radoslav Bučik, disertace, UPJŠ Košice, 2004) podle CORONAS-I

Přístroj SONG na družici CORONAS-F, který úspěšně měřil od července 2001 do prosince 2005, zjistil v několika slunečních erupcích výrazný tok gama záření neobvykle vysokých energií jakož i slunečních neutronů. To ukazuje na jaderné reakce protonů urychlených v erupcích do velmi vysokých energií a pomáhá v určování času urychlovacích procesů.



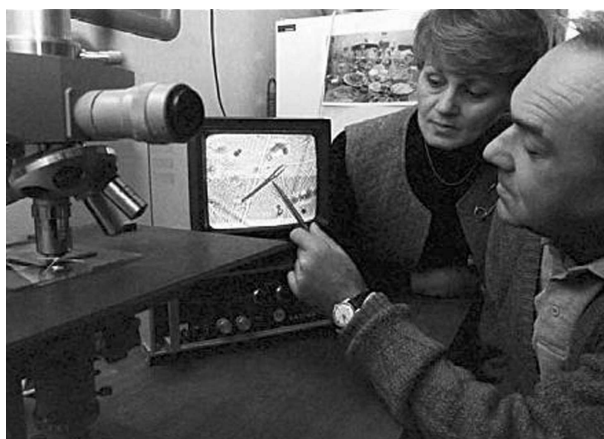
Obr. 4. V době extrémní sluneční erupce 28.10.2003 byly na CORONAS-F zaznamenány toky gama záření vysokých energií. Na družicích CORONAS-I a CORONAS-F spolupracoval ÚEF SAV s kolegy ve Skobelcynově ústavu jaderné fyziky Moskevské univerzity, hlavně s prof. S. N. Kuznecovem.

3. Kosmické záření na návratných družicích

Jádra kosmického záření na návratných družicích byla studována na ÚEF SAV poprvé v experimentu IK-6 v roce 1972. Šlo o sledování stop jak jader primárního záření tak i jejich fragmentů, a to za stínící vrstvou o tloušťce 3 g/cm². Zatímco v tomto experimentu bylo využito jaderných emulzí, v následujících pokusech této série byly exponovány pevnolátkové detektory stop. Kromě fragmentace primárního kosmického záření byla měření užitečná i pro dozimetrické účely, hlavně pozorováním tzv. LET spekter (Linear Energy Transfer – energie deponovaná do prostředí danou částicí na jednotce délky dráhy). Tato informace je důležitá pro kosmonauty, kteří jsou radiaci vystaveni v kosmu. Další experimenty byly provedeny na biologických družicích typu Kosmos a poslední z této série byl pokus s označením SK1-Dozimetria v době mise slovenského kosmonauta na stanici MIR v únoru 1999. Základní údaje o družicích, kterých bylo na ÚEF SAV využito pro studium fragmentace a LET spekter kosmického záření, jsou v tab. 1.

**Tab. 1. Družice využití na ÚEF SAV
pro studium fragmentace a LET spekter kosmického záření**

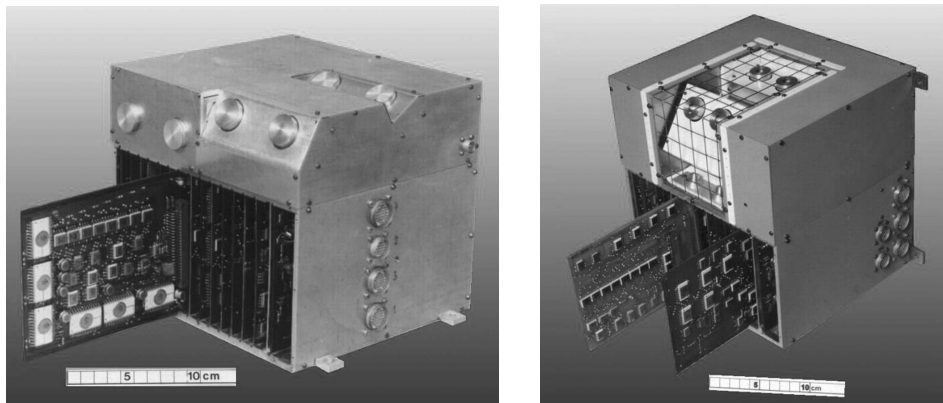
Družice	Datum startu	Počet dní	Per/Apog	sklon (°)	Exponovaný materiál
IK-6	07. 04. 1972	4	210/250	51	emulze
K-1129	25. 09. 1979	19	218/377	62,8	Kodak
K-1514	14. 12. 1983	5	226/288	82,4	K + CR 39
K-1667	10. 07. 1985	7	222/297	82,3	K + CR 39
K-1757	11. 06. 1986	15	189/252	82,3	4 × Kodak
K-1781	17. 09. 1986	14	217/405	70,4	Kodak
K-2044	15. 09. 1989	14	216/294	82,3	Kodak
OS-MIR	24. 06. 1991	34	389/410	51,6	Kodak
MIR	20. 2. 1999	6	324/352	51,6	Kodak



Obr. 5. Experimenty na návratných družicích a také v době mise slovenského kosmonauta v únoru 1999 vedl Dr. Ladislav Just, CSc. († 7. 3. 2004)

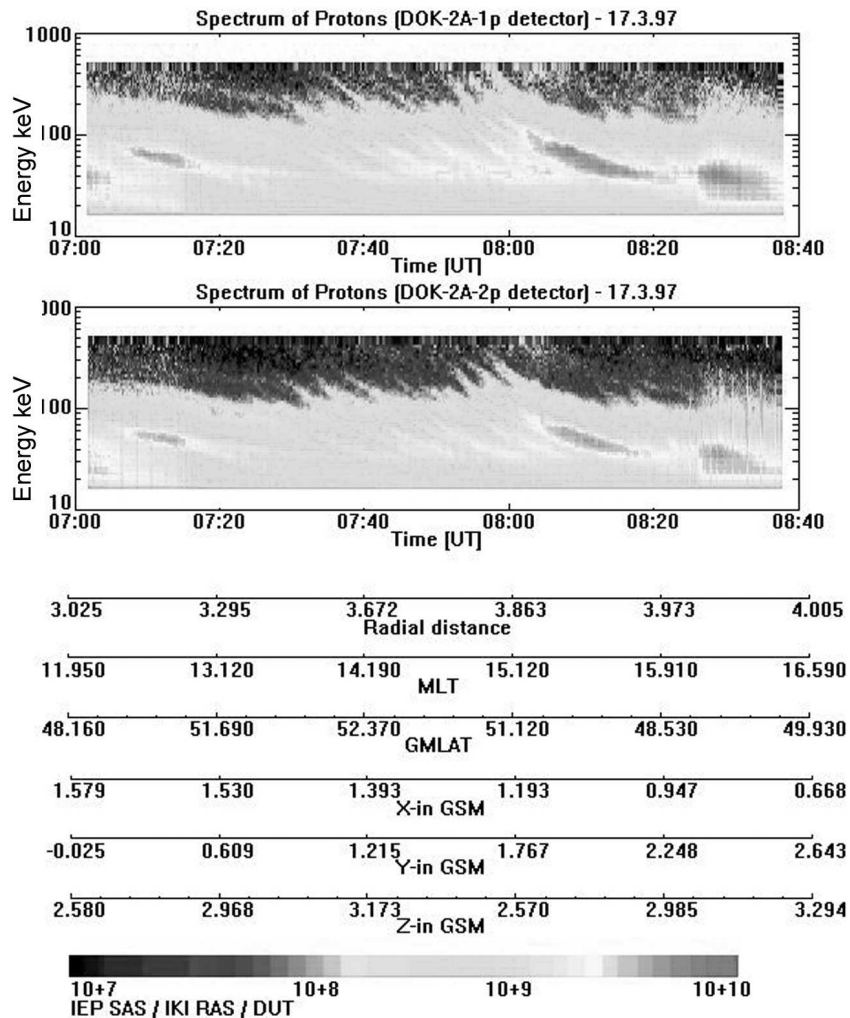
4. Energetické částice středních energií

V 80. letech se vedle výzkumu kosmického záření pozemní metodou začalo košické pracoviště orientovat na oblast tzv. středních energií. Jde o částice, jejichž energie jsou vyšší než energie částic kosmické plazmy (např. slunečního větru, kde se projevují kolektivní procesy) a nižší než jsou energie populace označované jako nízkoenergetické kosmické záření. Ukázalo se, že tato orientace tematiky, aspoň v následujících 10-15 letech, byla vhodná a přiměřená relativně malému pracovišti s omezenými finančními zdroji. Přinesla řadu nových poznatků a nových mezinárodních kontaktů. Toky částic středních energií, jejich energetické složení a úhlové rozdělení, jsou značně variabilní v okolí Země v prostorovém i časovém aspektu. Proto i relativně jednoduché aparatury monitorovacího typu se zde uplatnily v celé řadě fyzikálních úloh, na něž byly orientovány v uplynulých desetiletích družicové výzkumy: urychlování, transport a ztráty částic v zemské magnetosféře, hlavně při geomagnetických bouřích; přenos částic z meziplanetárního prostoru do magnetosféry; dálkový průzkum hraničních oblastí magnetosféry a jejich pohyby; původ částic před rázovou vlnou v zemském okolí a v tzv. přechodové oblasti; souvislosti částicových toků s efekty tzv. kosmického počasí ap. V této sérii měření šlo jednak o experimenty nízkorbitální, jakým byl např. úspěšně měřící spektrometr protonů a elektronů SPE1 na družici Active /IK-24, jednak o měření na vysokoapogeových družicích typu Prognoz (počínaje Prognozem-8 a 10). Doposud nejúspěšnějšími z této řady byla částicová měření v projektu Interball. Šlo o dvojici družic: (1) „tail“ byla vypuštěna na orbitu s apogee 200 000 km v srpnu 1995 a pracovala do roku 2000 a (2) „auroral“ s nižším apogee, ale zasahující do zajímavých oblastí vysokošířkové magnetosféry. Na obou měřily po dlouhou dobu částicové aparatury s označením DOK-2. Byly vyvinuty košickou skupinou techniků ve spolupráci s kolegy z Ústavu kosmických výzkumů v Moskvě a z Demokritovy univerzity v Xanthi v Řecku. Podrobná energetická spektra umožnila získat originální výsledky o původu částic v okolí rázové vlny jakož i ve vnějších oblastech



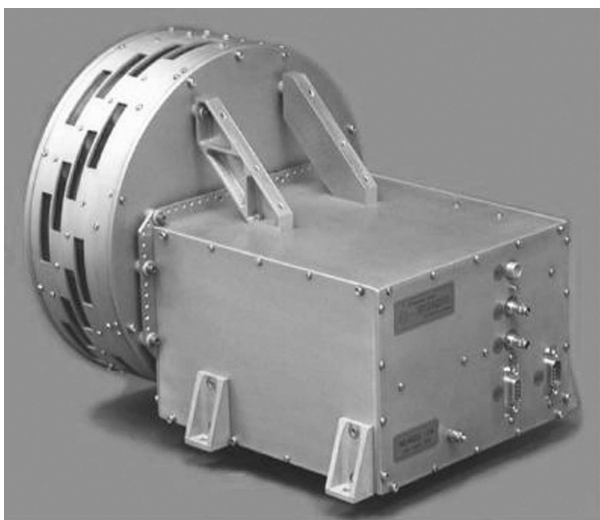
Obr. 6. Vlevo spektrometr elektronů a protonů středních energií na družici Active (téměř polární dráha 500×2500 km). Vpravo je aparatura DOK-2 měřící na družicích Interball-1 a 2. Spolupráce s IKI Moskva a Univerzitou Xanthi, Řecko. Na vývoji experimentů této série se podílel hlavně ing. Jozef Rojko, CSc. s kolegy.

zemské magnetosféry. K tomu přispěla i data z dvou subdružic (Magion-4 a 5), na nichž byly umístěny zjednodušené verze částicového monitoru. V zahraničí vznikl zájem o porovnávací studie s měřeními podobného typu na amerických, japonských i evropských družicích. V r. 1998 jsme v Košicích organizovali NATO Advanced Research Workshop s problematikou Interballu s reprezentativní účastí vědeckých pracovníků ze států střední, východní i západní Evropy, z Ruska, z USA, Japonska ap.



Obr. 7. Podrobné spektrum umožnilo pozorovat disperzní jevy energetických iontů ve vnější magnetosféře na odpolední straně přístrojem DOK-2 na Interballu-2. Hodnoty jsou $J(E) \cdot E^3$, kde $J(E)$ je diferenciální intenzita částic v jednotkách ($\#/cm^2 \cdot s \cdot ster \cdot keV$) a E je kinetická energie v keV. Tyto jevy ukazují na injekci částic na noční straně magnetosféry a z tvaru křivek a modelu magnetického pole lze odhadnout dobu a místo injekce. Na analýze těchto a dalších částicových dat se podílí dr. Marián Slivka, CSc.

V nedávné minulosti se kolegové z našeho pracoviště podíleli např. na vývoji přístroje s označením NUADU, který od srpna 2004 získává snímky rozložení toků energetických neutrálních částic na družici TC-2 evropsko-čínské mise Double Star. Neutrální energetické částice vznikají v okolí Země, v tzv. geokoroně, při nábojové výměně nabitých částic plazmy tzv. prstencového proudu s neutrálními atomy. Jejich měnící se distribuce poskytuje cenné údaje o rozvoji geomagnetických bouří, přičemž jde o dálkový průzkum stavu magnetosféry.



Obr. 8. Detekce energetických neutrálních atomů na evropsko-čínské družici Double Star TC-2 je prováděna přístrojem NUADU (vedoucí experimentu je prof. Susan McKenna-Lawlor, Irsko), který byl z podstatné části vyvinut na ÚEF SAV v Košicích. Přístroj provádí 3D „dálkový průzkum“ toku energetických částic při jejich nábojové výměně v geokoroně. Na vývoji tohoto a dalších přístrojů pro kosmické experimenty se na OKF podílí hlavně ing. Ján Baláž, PhD.

5. Závěr

Stručně jsme uvedli informace o některých experimentálních aktivitách košické skupiny kosmické fyziky v družicových experimentech. Připravených experimentů bylo více. Některé projekty zůstaly ve stadiu příprav a neuskutečnily se. Jedna z aparatur byla vyvíjena pro sondu k Marsu (Mars-96). Prošla úspěšně všemi testy před vypuštěním, ale v důsledku poruchy raketového motoru skončila mise Mars-96 neúspěchem. Podíl byl i na speciální elektronické části v misi ESA Rosetta (přístroj s označením ESS – Electronic Support System), která startovala 2. 3. 2004. Její přistání na kometě je plánováno na listopad 2014. V současné době se Oddělení kosmické fyziky ÚEF SAV podílí na přípravě dalších kosmických částicových experimentů.

Tabulka 2 uvádí přehled kosmických experimentů s účastí košického ÚEF SAV a přístrojů, které pracovaly v kosmu v automatickém režimu, nebo které byly vyvinuty pro kosmické experimenty.

**Tab. 2. Účast ÚEF SAV v experimentech na družicích a raketách
(měření v automatickém režimu registrace)**

Uvedeny jsou i aparatury, které byly zkonstruovány, ale nebyly na družicích vynešeny

Označení přístroje	Družice/raketa	Datum vypuštění	Perigeum (km)	Apogeum (km)	Sklon (°)
PG-1 *	IK-3	7. 8. 1970	206	1315	48.4
PG-1A *	IK-5	2. 12. 1971	196	1202	48.6
PG-1B *	IK-13	27. 1. 1975	278	1681	83.5
SK-1	IK-17	24. 9. 1977	466	511	83
DOK-T	PROGNOZ-8	20. 9. 1981	980	197390	65
URE-1	VERTICAL-10 **	21. 12. 1989	0	1510	–
DOK-1	INTERSHOCK	26. 4. 1985	421	200520	65
SPE-1	ACTIVE	28. 9. 1989	511	2487	82.6
DOK-S/1	ACTIVE/MAG 2	28. 9. 1989	511	2487	82.6
DOK-S/2	APEX/MAG 3	18. 12. 1991	440	3050	82.5
SONG-E	CORONAS-I	2. 3. 1994	500	500	83
DOK-2X	INTERBALL-T	3. 8. 1995	371	193 000	65
DOK-S/3	IB-T/MAG-4	3. 8. 1995	371	193 000	65
DOK-2A	INTERBALL-A	29. 8. 1996	7144	25 502	62.8
DOK-S/4	IB-A/MAG-5	29. 8. 1996	7144	25 502	62.8
SPE-1M	MIR	23. 4. 1996	324	352	51.6
SLED-2	MARS-96	16. 11. 1996	–	–	–
SPRUT-6	MIR	10. 1998	324	352	51.6
SONG-M	CORONAS-F	30. 7. 2001	500	500	83
EPD	CESAR	?	400	1000	70
MEP-1	COMPASS	?	350	400	79
NUADU	TC-2/Double Star	25. 7. 2004	700	39 000	90
PEEL	HotPay2 **	31. 1. 2008	0	381	–

* – přístroje zkonstruovány na MFF UK v Praze

** – raketa

Poděkování

Autor děkuje všem kolegům, jejichž práce jak při vývoji aparatur tak i při analýze získaných údajů byla důležitá pro to, aby byla v Košicích založena tradice kosmické fyziky s orientací na energetické kosmické částice, a aby tyto aktivity dále pokračovaly. Bez zahraniční spolupráce, která zde není kompletně uvedena, by uvedené aktivity byly nemyslitelné. V současnosti jsou práce v oblasti kosmické fyziky na ÚEF SAV podporovány Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základě Smlouvy č. APVV-51-053805.