

Lubomír Přech

Aktivní experimenty v kosmickém plazmatu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 51 (2006), No. 3, 239--258

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141321>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2006

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Aktivní experimenty v kosmickém plazmatu

Lubomír Přech, Praha

1. Úvod

Aktivní experimenty v kosmu jsou zvláštní vědeckou metodou zkoumání kosmického prostoru a zákonitostí procesů probíhajících v kosmickém plazmatu. Obrovská rozloha kosmického prostoru bývá pro laika obtížně představitelná. Podobně je tomu s variabilitou parametrů, které v kosmu popisují stav hmoty a energie. Za hlavní formu existence látky v kosmu je pokládáno plazma — tzv. čtvrté skupenství hmoty. Plazma je složeno z volně pohyblivých elektricky nabitých částic — elektronů a iontů, které na sebe vzájemně působí elektromagnetickými silami. S plazmatem se setkáme i přímo na povrchu Země — počínaje bleskem jako přírodním jevem až po výtvořiny člověka — výboje v osvětlovacích zářivkách nebo pokusná zařízení, ve kterých lidstvo usiluje o řízenou termojadernou reakci. Postupujeme-li vzhůru od povrchu naší planety, již v relativně nevelké výšce kolem 100 km narazíme na chladné, ne zcela ionizované plazma v ionosféře. S rostoucí výškou se mění jeho hustota, teplota i složení a ionosférické plazma postupně přechází v plazma prostupující širší oblast pod vlivem zemského magnetického pole, tj. zemskou magnetosféru. Slunce — naše mateřská hvězda — je těleso tvořené velmi horkým plazmatem a celá heliosféra — doména slunečního působení — je vyplněna expandujícím plazmatem ve formě slunečního větru (mimo magnetosféru planet). Popis plazmatického stavu látky zahrnuje řadu kolektivních i individuálních interakcí. Jeho složitost vedla vědce k budování fyzikálních teorií procesů v plazmatu na širokém základě empirických dat.

Okrajové a počáteční podmínky, za kterých probíhají fyzikální procesy v kosmickém prostoru, jsou velmi různorodé. Připomeňme jen změny sluneční činnosti a variabilitu zemské magnetosféry. Na rozdíl od experimentů s plazmatem v pozemské laboratoři máme při určitém měření v kosmu daleko méně informací o všech okrajových podmínkách. V laboratoři můžeme řadu podmínek a parametrů volit a preferovat tak určité vybrané typy procesů, v kosmu jsou však tyto podmínky dány. Na druhé straně jsou pro nás laboratorní podmínky někdy značně limitující, například interakční prostor je omezen velikostí vakuových komor, dochází ke kontaktu plazmatu se stěnami, jsme omezeni dosažitelným vakuem, rozsahem teplot atd.

Doc. RNDr. LUBOMÍR PŘECH, Dr. (1962), katedra elektroniky a vakuové fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, V Holešovičkách 2, Praha 8, e-mail: lubomir.prech@mff.cuni.cz

Kosmičtí fyzikové většinou provádějí jen tzv. *pasivní experimenty* — pouze měří a vyhodnocují různé parametry prostředí s použitím moderních experimentálních metod. Na rozdíl od toho v *aktivních experimentech* využíváme řady uměle vložených činitelů, abychom určitým způsobem ovlivnili některé parametry kosmického plazmatu. Pozorovanou odezvu toho prostředí pak používáme např. k trasování přirozených struktur či ověření teoretických mechanismů pro jednotlivé fyzikální procesy.

Rozlišení experimentů na aktivní a pasivní nebylo ovšem nikdy zcela striktní. Určité pasivní experimenty používají aktivních technik k měření parametrů místního nebo vzdáleného kosmického prostředí při snaze o jeho minimální ovlivnění (např. metoda měření elektrických polí pomocí driftu elektronového svazku nebo diagnostika „skrytých populací“ nízkoenergetických nabitých částic v magnetosféře). Některé aktivní experimenty byly motivovány technologickými problémy s konstrukcí a spolehlivostí družic provozovaných v různých oblastech kosmického prostoru (např. spojových družic na geostacionární dráze). Jiné experimenty pomáhají modelovat a testovat nové metody získávání elektrické energie nebo způsoby pohonu v kosmu (iontové motory, solárně energetický pohon — naposledy použitý u evropské kosmické sondy SMART-1 vyslané k Měsíci). Velké kosmické stanice (dříve ruský MIR, dnes mezinárodní stanice ISS) na nízkých oběžných drahách dále rozšiřují možnosti aktivních experimentů v kosmu. Spolu s okolním ionosférickým prostředím se mohou stát například obrovskými vakuovými laboratořemi „naruby“.

Tento článek má za cíl seznámit české čtenáře s některými milníky historie aktivních kosmických experimentů a naznačit jejich budoucí vývoj. Aktivních experimentů v kosmickém plazmatu se v době nedávné účastnili rovněž čeští vědci a některé jejich výsledky zde budou rovněž uvedeny.

2. Klasifikace aktivních experimentů

Obecným rysem všech aktivních kosmických experimentů je vložení nějakého vnějšího činitele do kosmického prostředí a studium následných systémových změn prostředí, proměn vlastního působícího činitele a ovlivnění objektu nesoucího jeho zdroj. Jako aktivní činitelé se používají různé *pevné objekty*, *elektromagnetická pole* (stacionární pole, radiové vlny ad.) a *emise hmoty* (neutrální plyn, kapalina, prachové částice nebo nabitě částice ve formě svazků iontů a elektronů v různých kombinacích).

Pevné objekty (družice, Měsíc atd.) v kosmu vytvářejí při svém pohybu napříč kosmickým plazmatem *brázdu* (angl. wake) — určitou analogii stínu, ze kterého jsou doslova vymety neutrální částice a ionty a tok elektronů do této oblasti je silně ovlivněn vytvořeným elektrickým polem. Tento jev pozorujeme, je-li rychlost uvedených objektů vůči plazmatu větší než tepelná rychlost částic, např. v ionosféře u družic na nízkých oběžných drahách¹⁾ nebo u objektů v meziplanetárním prostoru²⁾. Studium

¹⁾ Ionosférické plazma je relativně studené, a proto jsou zde ionty a neutrální částice pomalejší než obíhající družice.

²⁾ Rychlost iontů slunečního větru směrem od Slunce je naopak mnohem větší než jejich tepelná rychlost a rychlost pevných objektů.

prostředí brázdy v ionosféře byl věnován například experiment CHAWS (Charging Hazards And Wake Studies), prováděný během letu raketoplánu Endeavour STS-69, při kterém byl z nákladního prostoru vysunut štít o průměru 4 metry. V brázdě za takovým tělesem vzniká supervakuum zajímavé z technologického hlediska (např. produkce ultračistých polovodičových materiálů). Výpočty však ukazují, že při pohybu oblastmi s intenzivními toky rychlých elektronů (např. v aurálních oválech — oblastech výskytu polárních září) zde může docházet k velmi nebezpečnému vzájemnému nabíjení jednotlivých objektů.

Elektrická pole v aktivních kosmických experimentech se mohou vytvářet rozdílným nabíjením částí objektu vnitřními vysokonapěťovými zdroji (např. programy se sondovými raketami SPEAR — Space Power Experiments Aboard Rockets). Další možností je pohyb vzdálených objektů spojených vodičem (anglicky *tether*) napříč magnetickým polem (např. programy TSS — Tether Satellite System a PMG — Plasma–Motor–Generator), kde se využívá jevu elektromagnetické indukce. Cílem uvedených experimentů byl výzkum sběru proudu v ionosféře velmi nabitými tělesy (kolektory) a studium změn plazmatického prostředí v jejich okolí. Experiment PMG byl také první z řady projektů zaměřených na tzv. elektrodynamické systémy, které podle své konfigurace mohou pracovat buď jako zdroje elektrické energie, nebo pohonné jednotky kosmických objektů.

Radiových vln se v aktivních experimentech využívá zejména k cílenému ohřevu určitých oblastí ionosféry pohlcením elektromagnetické energie emitované z výkonných speciálních pozemních vysílačů. Jiné experimenty byly zaměřeny na studium šíření a interakce elektromagnetických vln s plazmatem při emisi z umělých družic (např. projekt AKTIVNÍ) nebo sondových raket (např. experiment OEDIPUS-C).

Injekce nabitých nebo neutrálních částic zahrnují emise *elektronových a iontových svazků a plazmatu* Xe^+ , Ar^+ , Hg^+ , Cs^+ aj. Některé z těchto experimentů blíže popíšeme v dalších částech tohoto článku.

Do této kategorie aktivních experimentů se řadí také vypouštění *oblaků neutrálního plynu*, např. Xe , N_2 , Ar . Jejich cílem bývá studium interakce svazků nabitých částic s neutrálními částicemi, ionizace neutrálního plynu, zvýšení návratových (zpětných) elektrických proudů a tím lepší neutralizace elektrického náboje družice, vzrůstajícího při emisi svazků nabitých částic nebo v důsledku jiných nabíjecích procesů. Řada těchto pokusů byla také motivována teoreticky předvídanými a laboratorně pozorovanými jevy kritické ionizační rychlosti (angl. *critical ionisation velocity* — *CIV*) při rychlém pohybu neutrálního plynu napříč magnetickým polem, kdy dochází k náhlé ionizaci plynu. Podmínkou tohoto jevu je, že kinetická energie molekul/atomů plynu převyšuje jeho ionizační energii (např. pro xenon je kritická ionizační rychlost 4,2 km/s). Proto se předpokládá existence jevu *CIV* také v okolí družic a raket vypouštějících neutrální plyn. Tepelná rychlost molekul/atomů takového plynu je zpravidla menší než orbitální rychlost, a tak se oblak plynu pohybuje spolu s družicí. V důsledku jevu *CIV* se očekává nárůst koncentrace plazmatu v okolí družice, lokální zvýšení elektrické vodivosti a zesílení elektrických proudů tekoucích na družici.

Chemicky uvolňovaná oblaka Ba , Cs , Sr , Ca slouží k trasování pohybu neutrálního plynu a plazmatu s tím, že v závislosti na postupující fotoionizaci použitých látek

slunečním ultrafialovým zářením zviditelňují lokální elektrická a magnetická pole a jejich vliv na pohyb vznikajících iontů. Vedle pokusů v ionosféře (např. z americké družice CRRES) do této skupiny patří též experimenty s vytvořením umělých komet ve slunečním větru (AMPTE-IRM).

Kosmickému prostoru se bohužel nevyhnuly ani série dnes zakázaných *jaderných výbuchů v kosmu*, uskutečněné na přelomu padesátých a šedesátých let. Z vědeckého hlediska je lze také klasifikovat jako poněkud svérázné aktivní experimenty, jejichž důsledkem byla injekce nabitých vysoce energetických částic do zemské magnetosféry, srovnatelná s populací těchto částic generovanou největšími slunečními erupcemi. Dlouhodobý záchyt těchto částic v magnetickém poli v nově vytvořených radiačních páslech prokázal stabilitu dipólového magnetického pole Země ve vnitřní magnetosféře.

Vzhledem k rozdílným podmínkám v okolním prostředí se aktivní experimenty obvykle dělí podle dráhy (resp. výšky nad Zemí, kde se experimenty provádějí) a typu použitého nosiče. Tzv. *sondové rakety* se pohybují po balistických drahách a na jejich vrcholu dosahují výšky od ≈ 70 do několika set kilometrů. Měření sondových raket mapují hustější oblasti ionosféry, které jsou nedostupné pro umělé družice. Rychlost rakety na vrcholu dráhy je zpravidla menší než tepelná rychlost ionosférických iontů (resp. rychlost iontově-akustických vln). Aktivní vrcholová fáze letu je bohužel velmi krátká a počítá se na minuty. Pouzdro s vědeckými přístroji se často ještě před počátkem aktivní fáze experimentu odděluje od nosného modulu s raketovým motorem. Po provedených experimentech sestupuje samostatně na padáku k zemskému povrchu.

Poněkud jiný charakter mají pokusy prováděné z *umělých družic a raketoplánů na nízké oběžné dráze* (angl. *low Earth orbit* — LEO), tj. ve výškách ≈ 200 až 10^4 km (raketoplány ve výškách 200 až 500 km). Okolní plazma (ionosféra a plazmosféra) je relativně husté a studené. Rychlost družice na nízké oběžné dráze je větší než tepelná rychlost iontů, ale menší než tepelná rychlost elektronů. Na rozdíl od sondových raket aktivní experimenty na umělých družicích mohou probíhat dlouhodobě (měsíce). U raketoplánů je zpravidla k dispozici jen několik dnů letu, zato experimentální zařízení, osazené na výměnných paletách a v laboratorních modulech v nákladním prostoru raketoplánu, může být daleko bohatší a s výhodou lze uplatnit přímé řízení experimentu kosmonauty-výzkumníky. Bohužel okolní prostředí kolem raketoplánu je kontaminováno činností systémů pro řízení polohy a postupným odplyňováním jeho povrchu.

Vysoké oběžné dráhy (výše než $\approx 10^4$ km) jsou doménou umělých družic, které na nich překračují hranice husté a studené plazmosféry. Zvláštním, ale velmi důležitým typem těchto orbit je *geostacionární* dráha. Magnetosférické kosmické plazma mimo plazmosféru (tj. plazmová vrstva, radiační pásy atd.) je relativně řídké a horké. Toky a energie nabitých částic jsou zde silně závislé na geomagnetické aktivitě. Některé družice a meziplanetární sondy dospívají na své dráze za hranice zemské magnetosféry a v minulosti bylo několik aktivních experimentů prováděno na kosmických sondách ve slunečním větru (viz zmíněné umělé komety).

Vedle aktivních experimentů v kosmu se uskutečňují různé podpůrné laboratorní experimenty ve velkých pozemních vakuových komorách. Jejich cílem je zpravidla vyvinout a ověřit experimentální techniky a zařízení posléze užitá na družicích. Další

laboratorní experimenty bývají zaměřeny na studium fyzikálních jevů původně pozorovaných v kosmickém prostoru. Přenesení výsledků těchto experimentů do kosmických podmínek však bývá dosti obtížné, protože základní charakteristické délky v plazmatu — Larmorův gyrační poloměr, Debyeův stínící poloměr a střední volná dráha částic mezi srážkami — se mění rozdílně s intenzitou magnetického pole, hustotou a teplotou plazmatu. Proto prakticky nelze docílit jejich shodných poměrů v laboratoři a kosmu.

Důležitou pomocnou technikou v aktivních experimentech jsou také počítačové simulace, které v principu umožňují modelovat jakékoliv plazmatické podmínky a velikosti systémů. V praxi jsou však výpočty limitovány dostupnými počítačovými zdroji. Modely byly, zejména ze začátku, dosti zjednodušené, např. počítané jen v jedné či dvou dimenzích a ne vždy se plně shodovaly s reálnými experimenty. S pokrokem počítačové techniky hrají dnes počítačové simulace v aktivních experimentech mnohem důležitější roli než dříve.

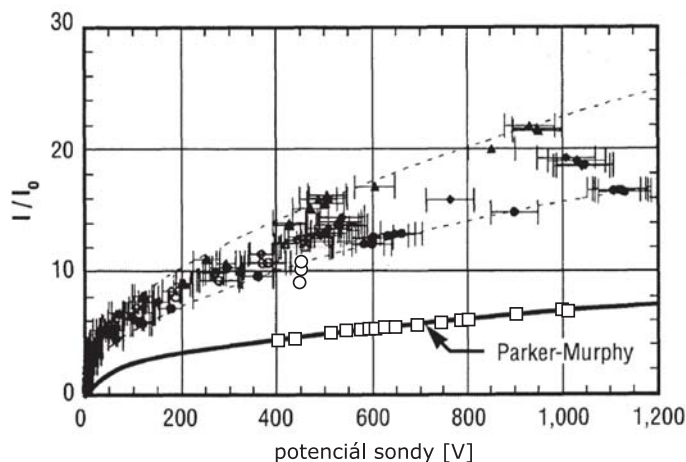
Pro studium fyzikálních procesů při aktivních experimentech v kosmickém plazmatu se užívá řada diagnostických metod, k nimž patří zejména měření elektromagnetických polí a vln, měření rozdělovacích funkcí nabitých částic (energetické a úhlové rozdělení a hmotnostní složení), sledování optických emisí včetně spektroskopických metod, určování elektrického potenciálu (nabití) družice proti okolnímu plazmatu a měření voltampérových charakteristik sond vyložených z družic do okolí.

Měření se provádějí jak lokálně z vlastního aktivního objektu (sondové rakety, družice nebo raketoplánu), tak vícebodově — např. oddělením speciálních diagnostických modulů od hlavního objektu. Tyto moduly pak letí samostatně v různých vzdálenostech od aktivního zdroje. V poslední době se často používá spojení dvou objektů tenkým lanem (vodičem) v řadě konfigurací elektrického obvodu. Pro sledování projevů aktivních experimentů se dále využívají pozemní pozorovací stanice a výzkumné letouny.

3. Od prvních experimentů s elektronovými svazky k umělé polární záři

Teoretická zkoumání i výsledky experimentálních měření v šedesátých letech minulého století ukazovaly, že polární záře jsou buzeny energetickými elektrony vysypávanými v oblastech tzv. aurorálních oválů z magnetosféry do zemské ionosféry. Ve výškách okolo 100 km se tyto elektrony srážejí s neutrálními atomy a uvádějí je do energeticky vybuzeného stavu. Při následné deexcitaci (přechodu atomu do základního energetického stavu) jsou emitovány fotony viditelného a ultrafialového záření. Při zkoumání vlastností vysypávaných částic se vědci zajímali, zda je možné polární záři vyvolat také uměle injektovaným elektronovým svazkem např. ze sondové rakety. Takovéto experimenty ale předpokládaly vyřešení dvou vzájemně souvisejících problémů. Jednak se předpokládalo možné nabíjení aktivního objektu, protože pokud by elektrický proud emitovaných elektronů překročil určité limity pro velikost návratových proudů

z okolního plazmatu na emitující objekt v magnetickém poli³⁾ (obr. 1), velice rychle by vzrostl kladný náboj objektu a emitovaný elektronový svazek by byl v elektrickém poli v okolí objektu velmi zpomalen nebo dokonce zastaven. Za druhé, samotná interakce elektronového svazku s okolním plazmatem by mohla svazek rozptýlit natolik, že by se nebyl schopen šířit na větší vzdálenosti od místa emise.



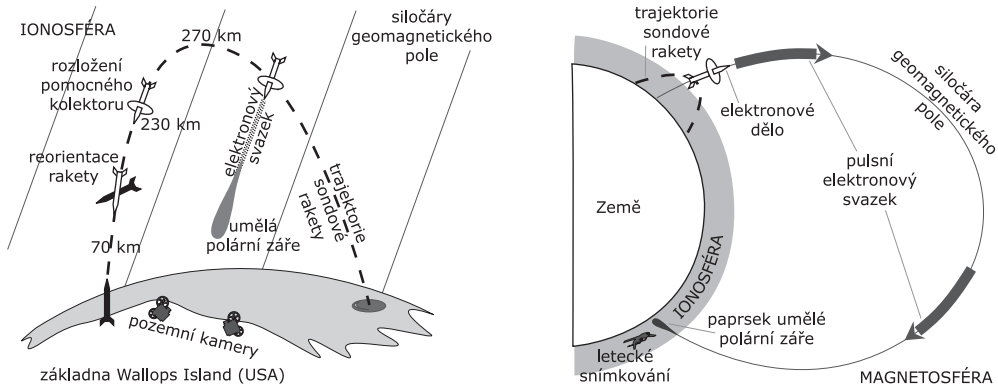
Obr. 1. Voltampérová charakteristika kulové sondy (družice/sondové rakety) podle teorie Parkera a Murphyho. Prázdné kroužky a čtverce představují naměřené body z VA charakteristik mateřského a dceřiného modulu experimentu CHARGE-2, plné body s vyznačenými experimentálními chybami odpovídají měřením u družice TSS-1R, viz dále v textu (podle [3] a [4]).

O tom, jaké procesy budou dominovat při injekci nabitých částic do kosmického plazmatu, spolurozhodují všechny charakteristiky prováděných aktivních experimentů (mimo jiné vlastnosti injekčního zařízení, parametry okolního plazmatu, charakteristiky emitujícího objektu a případné doplňkové emise). Například monoenergetický elektronový svazek za určitých podmínek sleduje jednoduchou, dobře definovanou jednočásticovou trajektorii, obvykle ve tvaru spirály podél siločar magnetického pole. Za jiných podmínek s obdobným svazkem probíhá řada kolektivních interakcí částic a polí v systému svazek–plazma, které podstatně modifikují energetické spektrum částic svazku a prostorové rozdělení hustoty a vedou ke vzniku řady plazmových nestabilit.

Od konce šedesátých let do dnešní doby se uskutečnilo několik desítek aktivních experimentů s emisí elektronových svazků ze sondových raket v ionosféře převážně ve výškách 100 ÷ 350 km (výjimečně také výše). Dva Hessovy [5] experimenty z přelomu šedesátých a sedmdesátých let jako první potvrdily možnost emise intenzivního elektronového svazku v ionosféře (pulsy elektronů s energií 20 keV a proudem až 0,5 A) a vyvolání umělé polární záře [6]. V této době vědci raději vybavili sondové rakety

³⁾ Pro odhad proudu na kulovou sondu v magnetickém poli se nejčastěji používá teorie Parkera a Murphyho [1], přehled ostatních teorií viz [2].

velkými doplňkovými kolektory pro zvýšení návratových proudů. Stabilita svazku na velké vzdálenosti byla potvrzena pozorováním světelné stopy vznikající při vysypávání elektronů ze svazku v magneticky konjugované oblasti ionosféry (obr. 2) na opačné hemisféře.

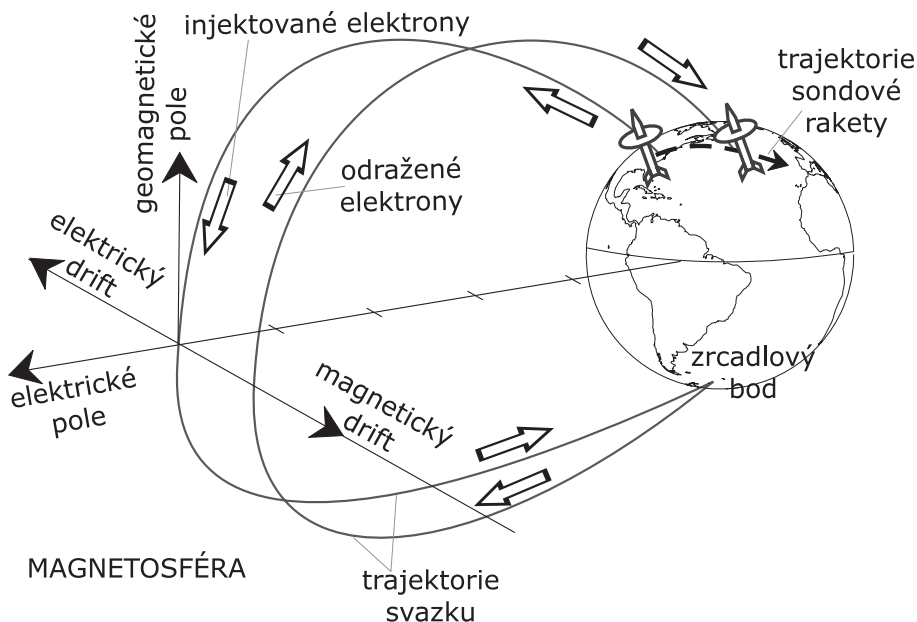


Obr. 2. Vlevo schéma prvního Hessova experimentu z ledna 1969 s umělou polární září, vpravo experiment s vybuzením umělé polární záře na opačné polokouli v roce 1972 (podle [7]).

V sovětských experimentech Zarnica-1,2 [7] provedených v malé výšce ~ 100 až 160 km byl naopak při emisi elektronového svazku obdobných parametrů (energie elektronů až 9 keV, proud $0,45$ A) pozorován vznik intenzivního výboje indukovaného svazkem (angl. *beam-plasma discharge*, BPD) v okolí sondové rakety, a to jak pozemními (optickými a radarovými), tak i palubními diagnostickými prostředky.

Nicméně u většiny raných experimentů vědce překvapovala dobrá neutralizace náboje raket a jejich podstatně menší nabíjení proti teoretickým předpokladům, a to i bez použití doplňkových kolektorů návratového proudu. Primárním cílem programu ECHO 1–7 [8], [9] bylo proto zvoleno trasování magnetosférických magnetických a elektrických polí pomocí injekce elektronového svazku (pulsy $10 \div 40$ keV, $50 \div 800$ mA) s následnou registrací elektronových pulsů odražených v magneticky konjugovaných zrcadlových bodech (obr. 3). Vedle toho se experimentátoři zaměřili na studium procesu samotné injekce elektronového svazku, jeho interakce s plazmatem, velikosti ovlivněné oblasti, generace radiových vln svazkem, relaxace rozdělovací funkce nabitých částic a neutralizace náboje rakety. Některé experimenty (ECHO-4, 5, 7) byly také doplněny zařízením pro vypouštění neutrálního dusíku, které kladné nabíjení rakety během emise elektronového svazku dokázalo snížit ze stovek voltů až jednotek kilovoltů na násobky ionizačního potenciálu dusíku (volty).

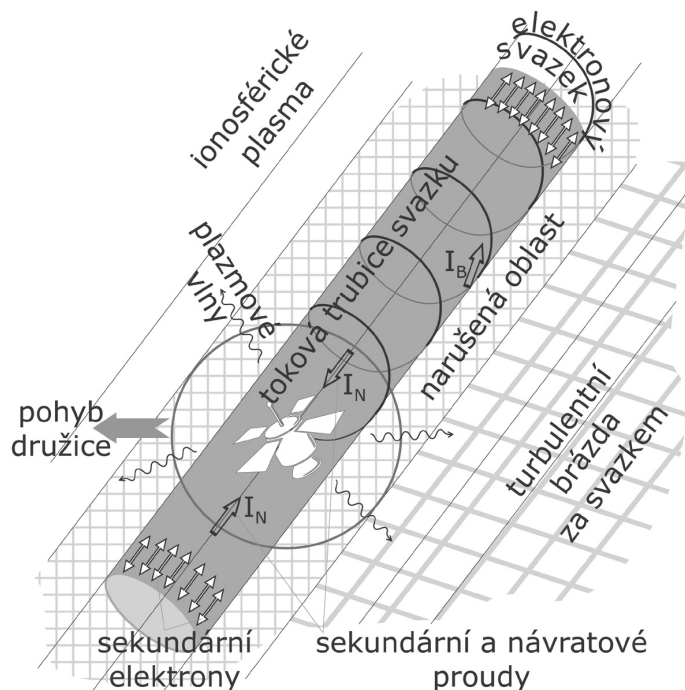
Ohřev ionosférického plazmatu a existence velkých elektrických polí v okolí během elektronové emise ze sondových raket byly pozorovány v experimentech POLAR-5 a ELECTRON-2 [9]. Plazmatická měření zde byla prováděna z mateřské sekce, která letěla po přibližně stejné dráze ve vzdálenosti několika desítek metrů od dceřiné sekce nesoucí elektronový injektor (v obou případech pulsy 10 keV, $10 \div 100$ mA). V této konfiguraci bylo možno provádět měření v oblasti svazkem porušeného ionosférického plazmatu bez jeho ovlivnění nabíjením měřicí platformy emisí elektronů. K dalším



Obr. 3. Schéma experimentů série ECHO s detekcí odražených pulsních elektronových svazků (podle [10], [8]). Zachycení odrazů představovalo obtížný problém, protože je možné jen tehdy, je-li letem sondové rakety východním směrem vyrovnán východní drift příchozího elektronového pulsu, způsobený pohybem elektronů v nehomogenním a zakřiveném geomagnetickém poli a ve zkrříženém elektrickém a magnetickém poli v magnetosféře.

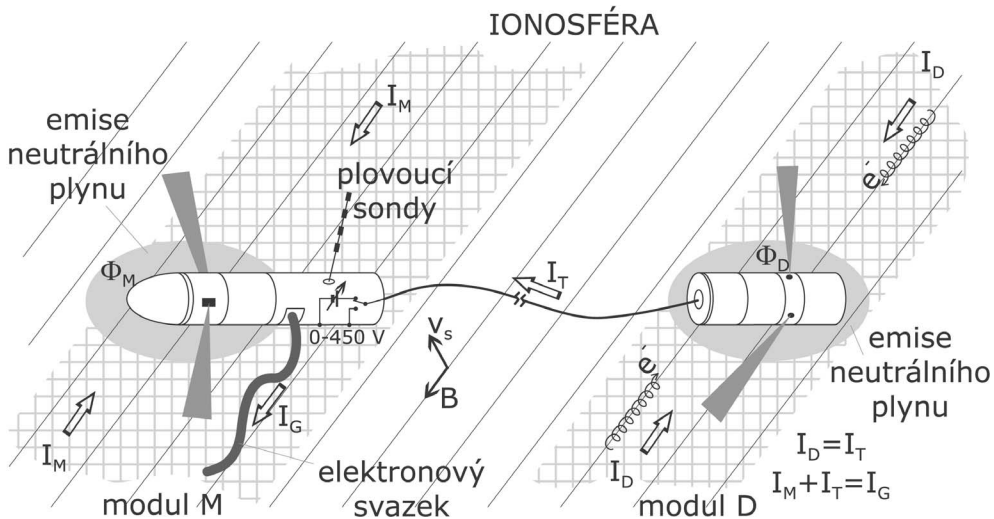
výzkumným programům s elektronovou emisí ze sondových raket na konci minulého století patří projekty ARAKS, Precede-Excede, japonská série raket K, E || B, MAIMIK, SCEX aj. (viz např. [8], [9], [11]).

Během všech těchto aktivních experimentů vědci ukázali, že emise elektronového svazku ze sondové rakety/družice (obr. 4) silně narušuje lokální prostředí ionizací neutrálních částic, generováním plazmových vln a ohřevem plazmatu v okolí družice a tokové trubice svazku, podobně jako při vysypávání elektronů v aurorálním oválu. Bezprostřední příčinou poruch je náhlá injekce velkého náboje spojená s nerovnoměrným rozdělením náboje v prostoru a velká přechodná elektrická pole při zapnutí a vypnutí svazku. K tomu se přidává relativní drift okolního plazmatu vůči energetickým primárním elektronům svazku i méně energetickým sekundárním elektronům a návratovým proudům. Sekundární a rozptýlené elektrony naplňují tokovou trubici podél magnetického pole na obě strany od emitující družice (tedy i opačným směrem, než je emitován primární svazek) do vzdáleností stovek i více kilometrů. Šířka narušené oblasti je odhadována na zhruba čtyřnásobek gyračního poloměru elektronů svazku. Při pohybu družice napříč magnetickým polem je narušená oblast nesymetrická, za tokovou trubicí svazku navíc vzniká turbulentní brázda. V narušeném okolí elektronového svazku jsou generovány plazmové vlny spontánní i indukovanou radiací a nestabilitami ve značně širokém frekvenčním rozsahu [11].



Obr. 4. Okolí objektu při injekci svazku energetických elektronů do ionosféry.

Zajímavé výsledky přinesl experiment CHARGE-2, který používal impulsní elektronový svazek (1 keV/50 mA) s velmi rychlými náběžnými hranami (pod 100 ns) ke studiu interakce s ionosférickým plazmatem ve výškách 160 ÷ 260 km. Dále prováděl pozorování nabíjení nosiče s vysokým časovým rozlišením (100 ns) a zabýval se elektrodynamikou spojeného systému [12]. Experiment sestával ze dvou sekcí (obr. 5) — mateřská sekce nesla elektronový injektor a diagnostickou aparaturu, dceřiná byla prostřednictvím vodiče (*tether*) oddělena napříč magnetickým polem až do vzdálenosti 426 m od mateřské sekce a mohla být použita jako referenční elektroda nebo připojena k mateřské sekci přes interní zdroj napětí. Po začátku elektronové emise, při opakovací frekvenci pulsů 500 kHz, vlivem nabíjení mateřské sekce prudce narostl její potenciál (během $\sim 10 \mu\text{s}$) a stacionární hodnoty dosáhl již za ~ 1 ms. Přitom potenciál obou galvanicky spojených nabitých sekcí vůči ionosférickému plazmatu činil podstatnou část urychlovacího napětí svazku. Výjimkou byly pracovní intervaly plynových trysek orientačního systému, kdy nabíjení objektu pokleslo na velmi malou úroveň. Při porovnání návratových proudů dopadajících na obě sekce se pak ukázalo, že na mateřskou sekci během elektronové emise připadá ve srovnání s dceřinou (pasivní) sekcí větší podíl, než odpovídá poměru jejich vodivých ploch při srovnatelných potenciálech sekcí vzhledem k okolnímu plazmatu [4]. Voltampérová charakteristika dceřiné sekce zhruba odpovídala předpovědi modelu Parkera a Murphyho, zatímco proud sbíraný mateřskou sekcí tento limit překračoval o 1 ÷ 2 řády (obr. 1). Tak se názorně projevuje vliv vzájemného působení emitovaného svazku a okolního plazmatu na zvýšení návratových proudů, především v nižších výškách.



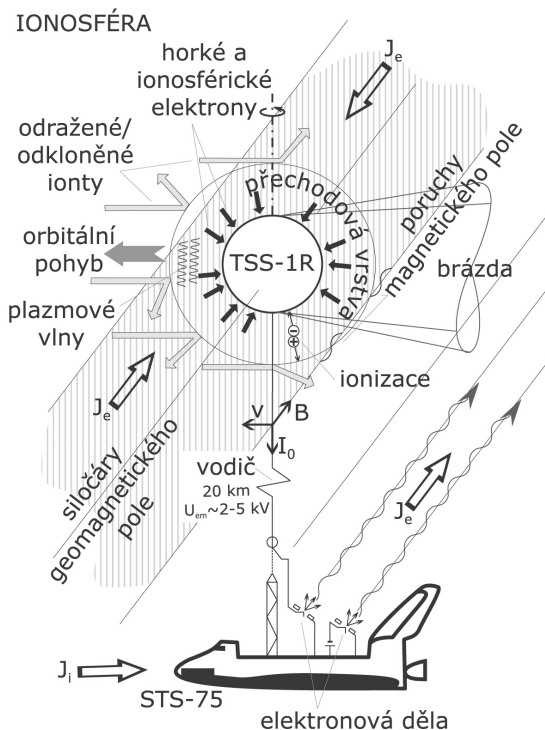
Obr. 5. Schéma uspořádání experimentu CHARGE-2.

4. Aktivní experimenty na palubách amerických raketoplánů

Od počátku osmdesátých let bylo provedeno několik aktivních experimentů s injekcí elektronových svazků a emisí plazmatu a neutrálních plynů z paluby amerických raketoplánů s využitím rozsáhlé aparatury pro částicovou, vlnovou a optickou diagnostiku. Během jednotlivých letů bylo postupně vyneseno na oběžnou dráhu několik přístrojových modulů v nákladním prostoru raketoplánů. Experimenty probíhaly na nízké oběžné dráze ve výškách $\sim 240 \div 325$ km s inklinací $\sim 28^\circ \div 60^\circ$, tj. v nízkých geomagnetických šířkách mimo oblasti polárních září. Z hlediska elektrodynamiky bylo pro tyto experimenty důležité, že obrovský povrch raketoplánů ($\sim 1100 \text{ m}^2$) je téměř celý pokryt nevodivými keramickými destičkami a ke sběru návratových proudů lze využít jen plochu $\approx 25 \div 60 \text{ m}^2$ hlavních motorů raketoplánu a doplňkové vodivé plochy přístrojového modulu.

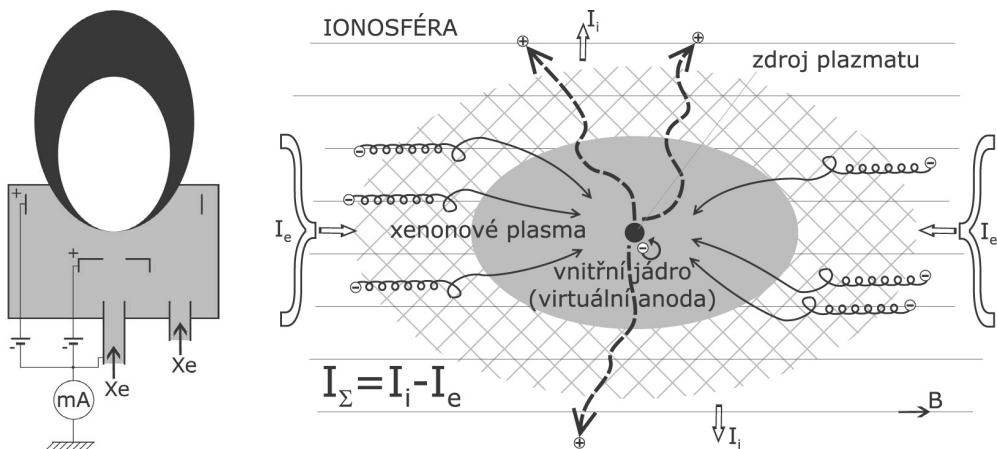
Mezi aktivními experimenty s emisemi nabitých částic je nejdůležitějších těchto šest letů: STS-3, STS-9/Spacelab-1 (oba raketoplán Columbia), STS-51/Spacelab-2 (Discovery), STS-45/Atlas-1, STS-46/TSS-1 (oba Atlantis) a STS-75/TSS-1R (Columbia). Tematika těchto experimentů je velmi bohatá. Nejdůležitější publikované práce se týkají procesů nabíjení [14] a neutralizace náboje raketoplánu během injekcí elektronových [15], [16] a iontových svazků [17], ověření funkce plazmových kontaktorů [18], anomálního nabíjení lodi při interakci elektronového svazku s oblakem neutrálního argonu [19], studia výboje indukovaného svazkem (BPD) [20], studia generace a šíření elektromagnetických a plazmových vln v těchto experimentech [21], pozorování struktury injektovaného elektronového svazku [23], úhlově-energetických charakteristik a prostorového rozdělení nabitých částic v okolí raketoplánu [25], struktury návratových proudů, studia jevu kritické ionizační rychlosti [26], [18] a vzbuzení umělé polární záře v atmosféře [27].

Za metodicky velmi přínosné považujeme zejména výsledky dvou elektrodynamických experimentů [3] SETS/TSS-1 a TSS-1R, které plánovaly vypuštění kulového satelitu TSS s vodivým povrchem upoutaného na izolovaném vodiči až do vzdálenosti 20 km od raketoplánu (obr. 6). Při pohybu takového systému na nízké oběžné dráze napříč magnetickým polem je mezi satelitem a raketoplánem indukováno elektromotorické napětí $\sim 0,22$ V na metr, tj. při plném rozvinutí vodiče až 5 kV. Galvanické spojení satelitu bylo voleno přes různé zátěže s doplňkovou emisí elektronů z raketoplánu tak, aby bylo možno studovat rovnováhu všech proudů na obou objektech. Elektrický obvod se uzavírá přes otevřené prostředí ionosféry. V režimu bez elektronové emise je rovnováha dosažena při kladném nabíjení satelitu a záporném u raketoplánu. Při vysokoimpedančním připojení mohl být satelit použit jako referenční elektroda v neporušeném plazmatu k měření nabíjení raketoplánu při elektronové emisi. Při druhém letu se vodič těsně před koncem odvíjení roztrhl, zapálil se obloukový výboj [28] a satelit TSS byl ztracen. Data získaná před i během této havárie však neplánovaně přinesla nové poznatky [3] o voltampérové charakteristice sběru proudu družicí TSS [29] (mnohem účinnější kolekce než podle teorie Parkera a Murphyho — viz obr. 1) a interakci satelitu s ionosférou (brázda, struktura a procesy v přechodové vrstvě — plazmové vlny a poruchy magnetického pole [30], nadteplné elektrony [31], odražené ionty). Významná je objevená modifikace těchto procesů při překročení potenciálu odpovídajícího energii ionosférických iontů v soustavě družice (cca 5 eV).



Obr. 6. Schéma uspořádání experimentu STS-75/TSS-1R.

V aktivních experimentech s injekcemi intenzivních elektronových svazků bylo vyzkoušeno několik způsobů neutralizace náboje emitujícího objektu. Vedle doplňkové emise kladných iontů se jako velmi účinné jeví různé palubní zdroje plazmatu. Emise oblaku plazmatu (angl. *plasma contactor*) může usnadnit přechod náboje mezi elektrodou (tělesem, které chceme nábojově neutralizovat) a okolním kosmickým plazmatem (obr. 7). Její užití bylo navrženo u elektrodynamických spojených systémů ke snížení impedance přechodové vrstvy při sběru elektronového proudu z ionosféry a snížení energetické náročnosti oproti pouhé emisi iontů (viz [32] a reference uvnitř). Vhodným zdrojem plazmatu je elektrický výboj v duté katodě, kterou je proud plynu (obvykle xenon) vyfukován. Anodou je samostatná elektroda nebo vodivý povrch nábojově neutralizovaného tělesa. Některé teoretické modely (např. [32]) při použití plazmového oblaku v podmínkách nízké oběžné dráhy v ionosféře předpovídají až několikanásobné zvýšení celkového proudu (iontový proud plazmového zdroje plus elektronový proud převedený oblakem na anodu plazmového zdroje). Modely předpokládají rozdělení plazmového kontaktoru do několika oblastí. Vnitřní jádro je izotropní, neboť husté plazma odstiňuje anizotropie vyplývající z přítomnosti zemského magnetického pole a orbitálního pohybu. Rozměry tohoto jádra by měly být rozhodující pro velikost sbíraného proudu ionosférických elektronů. Odhadují se např. podle hranice, kde dojde k vyrovnání koncentrace plazmatu oblaku a koncentrace okolních elektronů nebo vyrovnání střední elektronové srážkové frekvence (včetně efektivních srážek díky turbulenci v oblaku) s elektronovou cyklotronovou frekvencí.



Obr. 7. Schéma plazmového kontaktoru SEPAC (let STS-45/Atlas-1) (vlevo) a model plazmového kontaktoru (vpravo).

Použití plazmových kontaktorů ke kompenzaci emitovaného proudu elektronového svazku bylo ověřeno např. v rámci experimentu SEPAC na platformě STS-45/Atlas-1 amerického raketoplánu Atlantis [16], [18] a v rámci zmíněného výzkumu spojených systémů STS-46/TSS-1 a STS-75/TSS-1R. S úspěchem byly rovněž použity v jiném elektrodynamickém experimentu PMG (Plasma–Motor–Generátor) ke zvýšení proudu systémem [33].

5. Projekt APEX

Ačkoliv v dosavadní historii aktivních experimentů s injekcí svazků nabitých částic v kosmu byl shromážděn rozsáhlý experimentální materiál, není možno tuto oblast pokládat za uzavřenou. Otevřené otázky nacházíme v procesech interakce elektronových a iontových svazků s kosmickým plazmatem, vlnově-částicových procesech, v poznání struktury zasažené oblasti a procesů neutralizace náboje emitujícího objektu. Toto bylo jednou z motivací aktivních experimentů realizovaných v rámci mezinárodního programu INTERKOSMOS v projektu APEX⁴) v roce 1992. Pokusy tohoto projektu s intenzivními elektronovými a iontovými svazky byly prováděny na nízké oběžné dráze po dobu několika měsíců při velké variabilitě experimentálních podmínek. Vědecké přístroje poskytly zcela unikátní experimentální data, odlišná jak od dat z pokusů s injekcí svazků ze sondových raket a z paluby raketoplánů, tak od provedených aktivních experimentů na geostacionární oběžné dráze (oblast magnetosféry fyzikálními parametry nízkým drahám relativně vzdálená).

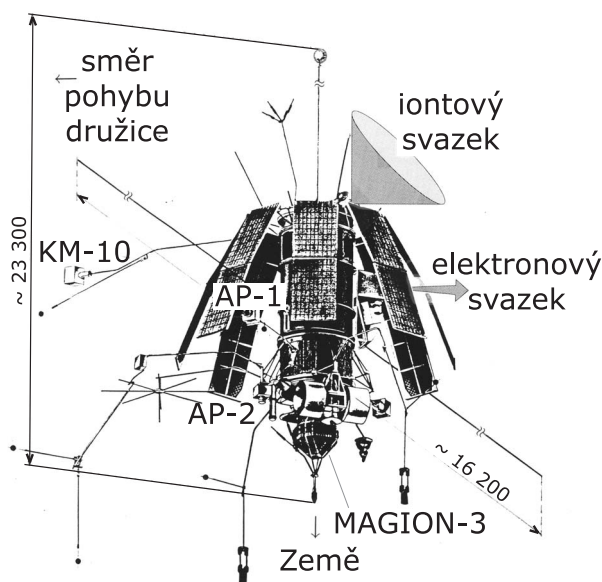
Skupina kosmické fyziky na katedře elektroniky a vakuové fyziky Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze se již od sedmdesátých let dvacátého století zabývala studiem rozdělovacích funkcí nabitých částic v kosmickém prostoru — od ionosféry až po magnetosféru a sluneční vítr. Na katedře vzniklo v rámci mezinárodního programu INTERKOSMOS několik spektrometrů nabitých částic (z významných projektů tehdejší doby jmenujme např. INTERSHOCK [34] na družicích Prognoz-8 a 10). V kosmu se na mnoha místech vyskytují přirozené svazky nabitých částic (např. v oblastech před okolozemní rázovou vlnou — tzv. foreshock, v aurorálním oválu při vysypávání nabitých částic aj.). Při studiu interakce těchto svazků s okolním plazmatem často vzhledem k neznalosti okrajových podmínek bylo možné dojít jen ke kvalitativním závěrům. Proto jsme se zajímali o simulaci těchto jevů v aktivních experimentech s elektronovými svazky, generovanými ze zdroje na umělé družici. Mezi základní cíle projektu APEX [35], [36], zahrnujícího *dvoubodová* měření na hlavní (aktivní) družici INTERKOSMOS-25 a české diagnostické subdružici MAGION-3, patřil výzkum buzení vln modulovanými svazky elektronů v plazmatu a dynamiky nabíjení a neutralizace družice. Použitými prostředky — elektronový svazek (~ 8 keV, 100 mA), xenonové plazma (~ 200 eV, 2 A) — se projekt řadí k dosud nejvýkonnějším aktivním perturbacím prováděným v ionoféře ve výškách 450 až 3000 km. Svazky obdobné nebo vyšší intenzity byly generovány pouze z kosmických laboratoří Spacelab/STS (americké raketoplány), ale v podstatně nižších výškách.

Obě družice (ruská INTERKOSMOS-25 s mezinárodním přístrojovým vybavením a česká MAGION-3) byly vypuštěny z kosmodromu Pleseck na společnou téměř polární dráhu (440 až 3080 km) s oběžnou dobou necelě 2 hodiny. Na hlavní družici byly instalovány přístroje pro komplexní vlnovou, částicovou a optickou diagnostiku procesů v plazmatu narušeném emisemi elektronových a iontových svazků v bezprostřední blízkosti družice. Aktivní experimenty byly prováděny v oblasti přímé viditelnosti při-

⁴) Nezaměňovat s experimenty na americké družici Advanced Photovoltaic and Electronic eXperiments (APEX) z roku 1994, ve kterých byly testovány vysokonapěťové sluneční panely.

jímací a řídicí stanice v Panské Vsi (Ústav fyziky atmosféry AV ČR) v prvním pololetí roku 1992, kdy se vzájemná vzdálenost hlavní družice a subdružice MAGION-3 jako vzdálené diagnostické sondy měnila v rozmezí -500 až $+1500$ km.

Kontejner hlavní družice (dále jen IK-25) měl přibližně tvar válce o poloměru $\sim 0,5$ m a výšce ~ 2 m (viz obrázek 8) s osmi vyklopenými panely slunečních článků. Družice byla vybavena systémem tříosé stabilizace, takže její podélná osa byla vždy směřována k Zemi (na obrázku 8 směrem dolů).



Obr. 8. Hlavní družice IK-25 s rozevřenými panely slunečních baterií. Na spodním konci obrázku (směrem k Zemi) je vidět subdružice MAGION-3 před oddělením. Patrná jsou čidla některých diagnostických přístrojů na vysunutých tyčích (senzory AP-1, AP-2, KM-10), elektrické antény a vyvažovací závěs s koulí (na horním konci obrázku) pro tříosou stabilizaci družice. Dále jsou vyznačeny výstupní kužele elektronového a iontového svazku.

Elektronový svazek o nominální energii ~ 8 keV a špičkovém proudu až 100 mA ([35]) byl injektován proti směru orbitální rychlosti IK-25, čemuž odpovídá úhel mezi směrem svazku a vektorem magnetické indukce (úhel stoupání šroubovice, angl. *pitch-angle*) zhruba $50^\circ \div 80^\circ$ podle momentální polohy družice na oběžné dráze. V aktivních experimentech bylo střídáno několik režimů pulzní modulace k řízení středního proudu elektronového svazku. Pulzy pevné délky byly opakovány buď s pevnou, nebo proměnnou frekvencí (40 kHz — dále označeno jako režim F40, resp. 30 Hz až 250 kHz — režim S250).

K provádění společných i samostatných výzkumů neutralizace elektronového svazku a potenciálu družice aj. byl na hlavní družici umístěn zdroj xenonového plazmatu — plazmový motor Hallova typu (tj. s uzavřeným driftem elektronů a rozšířenou zónou urychlení), podobný, jako byl použit ve starším aktivním experimentu PORCUPINE [38]. Neutralizace náboje iontového svazku byla zajišťována pomocným výbojem

v duté katodě. Generátor opět pracoval v několika různých modech, např. vypouštění neutrálního xenonu (cca 3 mg/s) nebo produkce kvazi-neutrálního Xe^+ plazmatu se střední kinetickou energií iontů ~ 200 eV, teplotou iontů 50 eV a celkovým tokem $\approx 10^{19}$ iontů/s (iontový proud 2 A) rozloženým v kuželi o vrcholovém úhlu $\sim 90^\circ$. V cyklu práce plazmového generátoru se střídaly fáze vypouštění neutrálního xenonu (dále Xe-A), startovní fáze (neutrální xenon plus žhavení a výboj v duté katodě, dále Xe-B) a emise plazmatu (s případnou modulací proudu na frekvenci 1 kHz).

Spektrometr nabitých částic PEAS [39], vyvinutý ve spolupráci KEVF MFF UK, Ionosférického oddělení ÚFA AV ČR, Ústavu kosmických výzkumů RAN a Institutu jaderné fyziky Moskevské univerzity jako součást diagnostického vybavení projektu APEX, nám umožnil získat neobvykle podrobné informace (ve srovnání s výsledky ostatních aktivních experimentů publikovanými do té doby) o energeticko-úhlovém rozdělení elektronů a iontů v nejbližším okolí emitující družice. Detekoval nabitě částice v rozsahu energií 50 eV až 30 keV ve dvou kolmých rovinách (dva toroidální elektrostatické analyzátoary AP-1 a AP-2) s 12 úhlovými sektory. Vedle toho byla k dispozici měření parametrů ionosférického plazmatu (koncentrace iontů a elektronová teplota) a potenciálu družice z přístroje KM-10 a měření vektoru magnetické indukce ze tří různých magnetometrů.

Lehká družice MAGION-3 [40] s vlastním systémem pohonu a orientace byla magnetickým tlumením nastavována hlavní osou přibližně do směru místního vektoru magnetického pole. Energetická rozdělení elektronů a iontů byla určována pomocí spektrometrů MPS/PPS a DOK-S. První z nich měřil energetické a úhlové rozdělení nabitých částic v rozsahu 0,1 až 5 keV nebo 0,2 až 20 keV pomocí dvou cylindrických elektrostatických analyzátorů (elektrony s pitch-úhly $\sim 0^\circ$ a $\sim 180^\circ$) a toroidálního analyzátoru (úhlového rozdělení elektronů/iontů v šesti pitch-úhlových sektorech). Spektrometr DOK-S registroval energetické elektrony a protony v rozsahu 20 až 1300 keV v osmi energetických stupních vždy ve směru kolmém na osu a rovnoběžném s osou družice. Vedle těchto přístrojů byla subdružice vybavena magnetometrem a dalšími přístroji pro měření parametrů ionosférického plazmatu (koncentrace, teplota) a kmitočtových spekter elektromagnetických vln.

Našími okruhy zájmu z široké palety cílů projektu APEX byly zejména

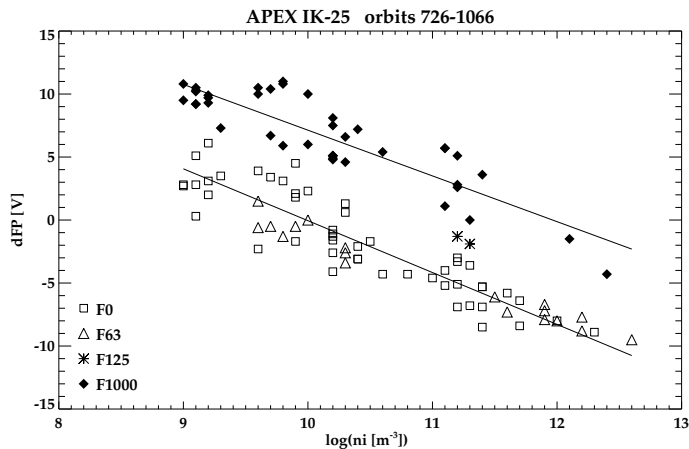
- studium dynamiky procesů nabíjení a neutralizace družice;
- studium vzájemného působení plazmatu a elektronového svazku v blízkosti družice, generování plazmových vln, nelineárních jevů a projevů dalekého dosahu;
- komplexní výzkum svrchní ionosféry, charakteristik plazmatu a vln, tepelných a nadteplných částic, zejména oblasti aurorálního oválu, prováděný v intervalech mimo aktivní experimenty, s využitím cenných dvoubodových měření na hlavní družici a subdružici.

Některé zajímavé výsledky týkající se aktivní části experimentů popisují následující odstavce.

Během života hlavní družice bylo provedeno několik desítek aktivních cyklů s různou kombinací režimů práce a parametrů injekce elektronů a plazmatu do ionosféry

(modulace proudu, pitch-úhel), prováděných ve všech dostupných výškách v širokém rozsahu koncentrací ionosférického plazmatu ($\sim 10^9 \div 10^{13} \text{ m}^{-3}$) na denní (osvětlené) i noční straně. Nejsilnější projevy nabíjení družice (potenciál několik desítek voltů) jsme pozorovali při neutralizaci elektronové emise pouze procesy interakce elektronů svazku s okolním plazmatem a vypouštěným neutrálním xenonem, za vzniku silných toků nadteplných elektronů jako součástí návratových proudů.

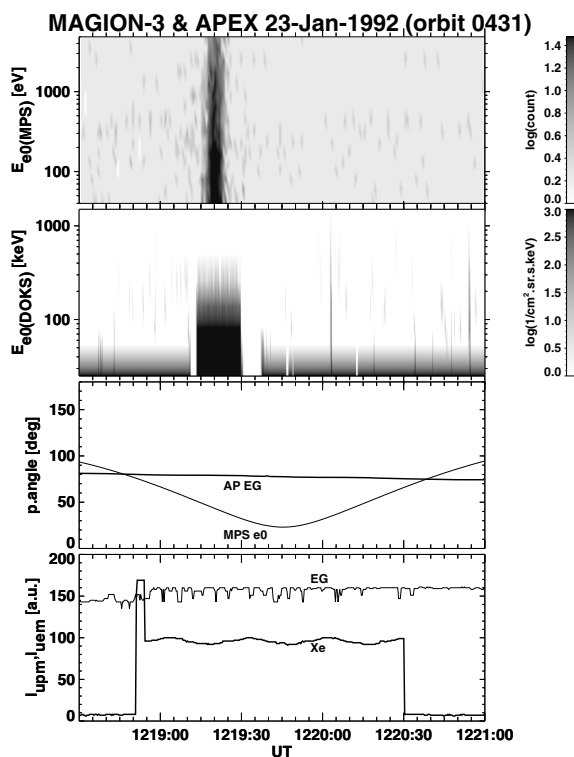
Vývoj potenciálu družice IK-25 při emisích xenonového plazmatu měl překvapující charakter [41]. Hlavními parametry se ukázala hustota ionosférického plazmatu v místě injekce a pracovní režim plazmového injektoru (resp. jeho modulační frekvence), viz obrázek 9. Pozorovaná změna potenciálu družice při zahájení emise může být kladná i záporná, roste s modulační frekvencí injektoru pro určitou hustotu ionosférického plazmatu, zatímco klesá prakticky lineárně od kladných k záporným hodnotám s logaritmem hustoty. V článku [42] jsme navrhli jednoduchý model, podle kterého nedomulovaná emise plazmatu vytváří hustý dobře vodivý oblak za družicí, který umožňuje efektivní výměnu elektronů s ionosférickým plazmatem (obdoba plazmového kontaktoru). Pro naše parametry emise lze poloměr tohoto oblaku odhadnout na cca 10 m. Model je schopen vysvětlit změny potenciálu obou polarit, předpokládáme-li nižší efektivitu sběru ionosférických iontů oblakem v nižších výškách (v blízkosti perigea). Zde převládají ionty kyslíku, které mají dosti velkou kinetickou energii a nemusí být v oblaku zachyceny.



Obr. 9. Závislost změny potenciálu družice na pracovním režimu plazmového generátoru a hustotě ionosférického plazmatu.

Před uskutečněním projektu APEX nebyla v literatuře popsána žádná přímá pozorování emitovaných elektronových svazků v tzv. vzdálené zóně, tj. ve vzdálenostech stovky kilometrů od místa emise v ionosféře. Dvoubodová měření v projektu APEX taková pozorování umožnila. Na subdružici MAGION-3 jsme zaznamenali krátké intenzivní toky elektronů v oblasti nízkých a středních geomagnetických šířek ($\text{INL} \leq 55^\circ$). Příklad takové události je uveden na obrázku 10. Základní charakteristiky impulzních toků [43] lze shrnout takto:

- doba trvání je cca $4 \div 10$ s (nebo průměr $10 \div 30$ km),
- energie elektronů dosahují stovek keV,
- divergence svazku je menší než 10° ,
- pitch-úhel detekovaných elektronů je $20 \div 70^\circ$ (v tomto rozmezí roste zhruba lineárně s geomagnetickou šířkou),
- v celém energetickém rozsahu nemají toky měřitelnou časově-energetickou disperzi,
- jednotlivé svazky jsou detekovány pouze v době aktivní činnosti elektronového injektoru a plazmového generátoru na hlavní družici IK-25,
- v okamžiku detekce se obě družice nalézají na oběžné dráze v rovině magnetického poledníku v blízkosti místního poledne a pohybují se směrem od pólu k rovníku,
- vzájemná vzdálenost obou družic během pozorování těchto jevů byla max. 550 km (80 s).



Obr. 10. Parametry elektronového svazku detekovaného během obletu 431 ($INL = 47^\circ$, $MLT = 14 : 47$, $ALT = 700$ km). Panely shora dolů: dynamická energetická spektra elektronů z detektorů MPS a DOKS; pitch-úhly pro elektrony registrované detektorem MPS a pro elektrony emitované z hlavní družice IK-25; střední proud elektronové emise a Xe iontů na hlavní družici.

Podobný jev nebyl jinými družicemi v těchto geomagnetických šířkách v ionosféře pozorován. Jako možný zdroj těchto svazků přicházejí v úvahu prakticky jen dvě

možnosti: buď jde o elektrony, emitované z hlavní družice nebo pocházející z jejího okolí a urychlené nějakým mechanismem až do pozorovaných energií; nebo mají elektrony původ v radiačních páslech, u kterých aktivní činnost družice spustila anomální vysypávání. Podrobný rozbor nevyklučuje ani druhou variantu, ale první se zdá pravděpodobnější, neboť drift ve zkříženém elektrickém a magnetickém poli by vysvětloval požadovaný přenos elektronů napříč magnetickým polem a počítačové simulace ukazují, že určité vlnově-částicové procesy v interakci svazek–plazma vedou k urychlení některých elektronů nad energii injektovaného svazku. Bohužel žádný z publikovaných simulačních modelů nezohledňuje všechny zvláštnosti aktivních experimentů projektu APEX (zejména kombinovanou emisi elektronového svazku a plazmatu, specifický tvar družice atd.). Na druhé straně byla publikována např. pozorování intenzivních toků elektronů urychlených až do energií 20 keV radiofrekvenčním polem v oboru tzv. hvizdových frekvencí, horní hybridní a lokální gyrofrekvence, které bylo buzeno ze sondové rakety během aktivního experimentu OEDIPUS-C [44]. To ukazuje na velmi silnou interakci vln a ionosférických elektronů. Bohaté spektrum plazmových vln bylo generováno i během aktivních emisí APEX, jak ukazuje případ registrace harmonických frekvencí ve vysokofrekvenčních vlnových spektrech [45] registrovaných na subdružici Magion-3 ve stejném časovém intervalu, zahrnujícím i pozorovaný impulzní tok na obrázku 10.

6. Shrnutí

V tomto článku jsme chtěli českým čtenářům představit aktivní experimenty v kosmickém plazmatu — oblast fyzikálního výzkumu, která stojí tak trochu ve stínu pilotovaných kosmických letů, výzkumu Slunce, planet a jiných objektů naší sluneční soustavy a dalších mediálně přitažlivých témat kosmického výzkumu. Aktivní kosmické experimenty však sehrály v minulosti důležitou roli při poznávání základních fyzikálních zákonitostí a procesů v kosmickém plazmatu a přispěly k poznání okolí Země. V mezinárodních odborných časopisech bylo v dosavadní historii aktivních kosmických experimentů publikováno několik set prací, nehledě na pravidelné tematické sekce věnované tomuto oboru na velkých mezinárodních vědeckých konferencích i sympoziích. Tyto výsledky vědci a inženýři zúročili v nových měřicích metodách, konstrukci družic a sond i nových formách kosmického pohonu a další aktivní experimenty se nadále připravují.

Protože tematika aktivních kosmických experimentů je velice široká, v tomto článku se zmiňujeme o některých oblastech jen velmi stručně nebo vůbec. Doufáme však, že článek čtenáři poskytl základní přehled o možnostech a výsledcích aktivních experimentů a zároveň i připomněl účast českých vědců na tomto poli fyzikálních bádání. Další informace může čtenář nalézt v citované literatuře a na internetu.

Poděkování. Autor děkuje svým kolegům J. ŠAFRÁNKOVÉ a Z. NĚMEČKOVÍ, pod jejichž vedením se účastnil přípravy a zpracování výsledků projektu APEX, za inspiraci a připomínky k textu a J. PAVLŮ za technickou pomoc při zhotovení obrázků.

L i t e r a t u r a

- [1] PARKER, L. W., MURPHY, B. L.: *Potential buildup on an electron-emitting ionospheric satellite*. J. Geophys. Res. 72 (5) (1967), 1631–1636.
- [2] LAFRAMBOISE, J. G., SONMOR, L. J.: *Current collection by probes and electrodes in space magnetoplasmas: A review*. J. Geophys. Res. 98 (A1) (1993), 337–357.
- [3] STONE, N. H., BONIFAZI, C.: *The TSS-1R mission: Overview and scientific context*. Geophys. Res. Lett. 25 (4) (1998), 409–412.
- [4] MYERS, N. B. et al.: *A comparison of current-voltage relationships of collectors in the Earth's ionosphere with and without electron beam emission*. Geophys. Res. Lett. 16 (5) (1989), 365–368.
- [5] HESS, W. N. et al.: *Artificial aurora experiment: Experiment and principal results*. J. Geophys. Res. 76 (25) (1971), 6067–6081.
- [6] DAVIS, T. N. et al.: *Artificial aurora experiment: Ground-based optical measurements*. J. Geophys. Res. 76 (25) (1971), 6082–6092.
- [7] CAMBOU, F. et al.: *The Zarnitza rocket experiment on electron injection*. In *Space Research XV*, p. 491, Akademie-Verlag, Berlin 1975.
- [8] WINCKLER, J. R.: *The application of artificial electron beams to magnetospheric research*. Rev. Geophys. Space Phys. 18 (3) (1980), 659–682.
- [9] GRANDAL, B., (ed.): *Artificial particle beams in space plasma studies*. NATO Adv. Study Inst. Ser. B: Physics, Plenum Press, New York 1982.
- [10] WINCKLER, J. R.: *Artificial electron beams as probes of the magnetosphere*. J. Spacecr. Rock. 20 (3) (1983), 293–298.
- [11] NEUBERT, T., BANKS, P. M.: *Recent results from studies of electron beam phenomena in space plasmas*. Planet. Space Sci. 40 (2/3) (1992), 153–183.
- [12] MYERS, B. et al.: *Vehicle charging effects during electron beam emission from the CHARGE-2 experiment*. J. Spacecr. Rock. 27 (1) (1990), 25–37.
- [13] GILCHRIST, B. E. et al.: *Electron collection enhancement arising from neutral gas jets on a charged vehicle in the ionosphere*. J. Geophys. Res. 95 (A3) (1990), 2469–2475.
- [14] OBERHARDT, M. R. et al.: *Positive spacecraft charging as measured by the shuttle potential and return electron experiment*. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-40, (6) (1993), 1532–1541.
- [15] BANKS, P. M. et al.: *Results from the vehicle charging and potential experiment on STS-3*. J. Spacecr. Rock. 24 (2) (1986), 138–149.
- [16] SASAKI, S. et al.: *Neutralisation of beam-emitting spacecraft by plasma injection*. J. Spacecr. Rock. 24 (3) (1987), 227–231.
- [17] SASAKI, S. et al.: *Gas ionization induced by a high speed plasma injection in space*. Geophys. Res. Lett. 13 (5) (1986), 434–437.
- [18] KATZ, I. et al.: *Interactions between the space experiments with particle accelerators plasma contactor and the ionosphere*. J. Spacecr. Rock. 31 (6) (1994), 1079–1084.
- [19] MARSHALL, J. A. et al.: *Spacelab 1 experiments on interaction of an energetic electron beam with neutral gas*. J. Spacecr. Rock. 25 (5) (1988), 361–367.
- [20] SASAKI, S. et al.: *Ignition of beam plasma discharge in the electron beam experiment in space*. Geophys. Res. Lett. 12 (10) (1985), 647–650.
- [21] NEUBERT, T. et al.: *Waves generated during electron beam emissions from the space shuttle*. J. Geophys. Res. 91 (A10) (1986), 11321–11329.
- [22] BUSH, R. I. et al.: *Electromagnetic fields from pulsed electron beam experiments in space: Spacelab-2 results*. Geophys. Res. Lett. 14 (10) (1987), 1015–1018.
- [23] BANKS, P. M., RAITT, W. J.: *Observation of electron beam structure in space experiments*. J. Geophys. Res. 93 (A6) (1988), 5811–5822.
- [24] WILHELM, K., STUDEMANN, W., RIEDLER, W.: *Electron flux intensity distributions observed in response to particle beam emissions*. Science 225 (July 13) (1984), 186–188.

- [25] BURCH, J. L.: *Space plasma physics results from Spacelab 1*. J. Spacecr. Rock. 23 (3) (1986), 331–335.
- [26] MARSHALL, J. A. et al.: *CIV experiments on Atlas-1*. Geophys. Res. Lett. 20 (6) (1993), 499–502.
- [27] BURCH, J. L. et al.: *Artificial auroras in the upper atmosphere 1. Electron beam injections*. Geophys. Res. Lett. 20 (6) (1993), 491–494.
- [28] GILCHRIST, B. E. et al.: *Enhanced electrodynamic tether currents due to electron emission from a neutral gas discharge: Results from the TSS-1R mission*. Geophys. Res. Lett. 25 (4) (1998), 437–440.
- [29] THOMPSON, D. C. et al.: *The current-voltage characteristics of a large probe in low Earth orbit: TSS-1R results*. Geophys. Res. Lett. 25 (4) (1998), 413–416.
- [30] IESS, L. et al.: *Plasma waves in the sheath of the TSS-1R satellite*. Geophys. Res. Lett. 25 (4) (1998), 421–424.
- [31] WINNINGHAM, J. D. et al.: *Suprathermal electrons observed on the TSS-1R satellite*. Geophys. Res. Lett. 25 (4) (1998), 429–432.
- [32] GERVER, M. J., HASTINGS, D. E., OBERHARDT, M. R.: *Theory of plasma contactors in ground-based experiments and low Earth orbit*. J. Spacecr. Rock. 27 (4) (1990), 391–402.
- [33] RAITT, W. J.: *Stimulating our piece of the universe: Active experiments*. Rev. Geophys. Suppl., U. S. National Report to Int. Union of Geodesy and Geophysics 1991–1994 (1995), 559–564.
- [34] FISCHER, S. (ed.): *INTERSHOCK project: Science objectives, mission overview, instrumentation and data processing*. Publ. of the Astr. Inst. CSAV, Astronomical Institute of Czech. Academy of Sci., Ondřejov, Czechoslovakia 1985.
- [35] DOKUKIN, V. S.: *The APEX project scientific facility orbital complex*. In *Project APEX. Scientific purposes, simulation, technology and equipment of experiment* (in Russian), p. 16, NAUKA, Moscow 1992.
- [36] PŘECH, L.: *Aktivní experimenty v magnetosféře Země: projekt APEX*. Disertační práce, Univerzita Karlova v Praze 1995.
- [37] ARCIMOVIC, L. A. a kol.: *Vývoj stacionárního plazmového motoru (SPE) a jeho užití na umělé družici „Meteor“* (v ruštině). Kosm. Issled. 12 (3) (1974), 451–468.
- [38] HAERENDEL, G., SAGDEEV, R. Z.: *Artificial plasma jet in the ionosphere*. Adv. Space Res. 1 (1981), 29.
- [39] NĚMEČEK, Z. et al.: *Artificial electron and ion beam effects: APEX experiment*. J. Geophys. Res. 102 (A2) (1997), 2201–2212.
- [40] TRÍSKA, P. et al.: *A subsatellite for mother-daughter active space experiments*. Adv. Space Res. 10 (7) (1990), 165–168.
- [41] PŘECH, L. et al.: *Artificial ion beam effects on spacecraft potential*. Adv. Space Res. 24 (8) (1999), 1027–1032.
- [42] ZILAVY, P. et al.: *Spacecraft potential during an active experiment: a comparison of experimental results with a simple model*. Ann. Geophys. 21 (4) (2003), 915–922.
- [43] PŘECH, L. et al.: *Actively produced high-energy electron bursts within the magnetosphere: the APEX project*. Ann. Geophys. 20 (10) (2002), 1529–1538.
- [44] HUANG, C. Y. et al.: *Electron acceleration by megahertz waves during OEDIPUS C*. J. Geophys. Res. 106 (A2) (2001), 1835–1847.
- [45] ROTHKAEHL, H. et al.: *Remote spacecraft observations of waves excited by the pulse electron beam injected into ionosphere*. Adv. Space Res. 15 (12) (1995), 25–28.