

## KOZMICKÉ ŽIARENIE A KOZMICKÉ POČASIE

*Prof. Ing. Karel Kudela, DrSc.*

*kkudela@kosice.upjs.sk*

*Ústav experimentálnej fyziky SAV, 040 01 Košice*

### Úvod

Častice vysokých energií vyskytujúce sa v kozme sú jednak dôležité pre základný fyzikálny výskum, jednak majú dôležitú úlohu v efektoch kozmického počasia. Časť z nich je urýchľovaná za zemskou magnetosférou (kozmicke žiarenie), druhá populácia pociťovaná v zemskom okolí získava energiu v magnetosfére. V druhej kapitole je súhrn niektorých poznatkov o kozmických energetických časticach. V tretej sú uvedené postupne jednotlivé efekty kozmického počasia a jeho súvislosti s kozmickými energetickými časticami. Časť textu je mierne upravenou verziou z práce 1 uvedenej v zozname použitej literatúry.

### Kozmické žiarenie

#### Galaktické kozmické žiarenie.

Galaktické kozmické žiarenie (GKŽ) sú častice vysokých energií, ktoré prichádzajú do heliosféry zo vzdialených oblastí Galaxie. V roku 1912 Victor F. Hess z Univerzity vo Viedni spolu so svojimi asistentmi podnikol viaceré balónové lety do výšky okolo 5300 m. Objavil dôkaz o veľmi prenikavej radiácii (kozmicke žiarenie), ktoré prichádza z vonkajšieho priestoru za našou atmosférou. Vo výškach 1500-2500 m mala radiácia približne rovnakú hodnotu ako na zemskom povrchu. Vyššie potom pozoroval, že intenzita radiácie vzrastá s výškou a na úrovni 3600 m už bola 4 až 5 krát vyššia než na zemskom povrchu. Tým bolo potvrdené, že zdroj ionizácie je za atmosférou Zeme. Až v r. 1936, V. F. Hess získal za tento objav Nobelovu cenu. Postupne bolo ukázané, že hlavnou zložkou kozmického žiarenia sú protóny. Intenzita kozmického žiarenia sa podstatne znižuje s energiou. Ukazuje to obrázok 1. Kozmické žiarenie je pozorované až do energií nad  $10^{20}$  eV. V oblasti energie ( $E$ ) nad  $10^9$  eV je tok (počet častíc pripadajúcich za jednotku času na jednotku plochy z jednotkového priestorového uhlu) aproximovateľný jednoduchým mocninovým zákonom  $\sim E^{-n}$ . Zmena toku s energiou sa označuje ako energetické spektrum. V prvom priblížení možno  $n$  považovať za konštantu (pre diferenciálne energetické spektrum asi 2.7). Najväčšie zmeny  $n$  (jeho zvýšenie) sú pozorované v oblasti nad  $10^{15}$  eV („koleno“) a v oblasti nad  $10^{18}$  eV, kde sa jeho hodnota znižuje a je znova blízka 2.7 („členok“). Zaujímavými sú otázky urýchľovania častíc do extrémnych energií, ich pôvodu a zloženia a tiež anizotropie. K tomu sú potrebné pozorovania s vysokým geometrickým faktorom.

V GKŽ dominujú jadrá vodíka. Zloženie kozmického žiarenia je odlišné od zloženia látky Slnčnej sústavy. Hlavnými odlišnosťami sú neobvykle vysoké zastúpenie Li, Be, B a tiež napr. Cr, Ti v kozmickom žiarení. Zo zastúpenia prvkov a ich jednotlivých izotopov v kozmickom žiarení možno usudzovať na to, že pozorované GKŽ vo vnútornom slnečnom systéme nie je „primárne“ v zmysle zdroja alebo zdrojov. Nadbytok uvedených jadier je výsledkom fragmentácie jadier skupiny C,N,O a tiež jadier Fe.

V heliosfére je GKŽ modulované hlavne plazmou slnečného vetra. Tá vyteká nehomogénne a časovo premenlivo zo slnečného povrchu a pretože jeho energia v jednotke objemu je vyššia než energia magnetického poľa, je toto pole (v jednoduchej aproximácii sú jeho siločiarly považované za vmrazené v totálne ionizovanej plazme) plazmou vynášané do

vonkajších oblastí heliosféry a tým ovplyvňuje prítok častíc GKŽ. Základy fyziky modulácie kozmického žiarenia položil Parker v r. 1965.

Diferenciálne energetické spektrum kozmického žiarenia meraného vo vnútornej Slnčnej sústave je závislosť toku častíc od ich energie. Táto závislosť silne klesá s energiou. Pri nízkych energiách je pozorovaná modulácia intenzity v Slnčnej sústave. Ukázaný je predpokladaný tvar spektra za hranicou heliosféry. Kozmické žiarenie svojimi vysokými energiami presahuje možnosti pozemných urýchľovačov častíc. Nízkoenergetické kozmické žiarenie možno pozorovať na družiciach, balónoch a kozmických sondách. Pri vysokých energiách je jedinou možnosťou pozorovanie sekundárnych častíc na alebo pod povrchom Zeme.

Zaujímavé je zloženie kozmického žiarenia. Je tvorené prevažne protónmi. Porovnanie relatívneho zastúpenia prvkov v GKŽ so zastúpením v látke Slnčnej sústavy ukazuje na dve anomálie. Jednak je pozorovaný nadbytok jadier Li, Be, B, ktoré sú fragmentami ťažších jadier (C, N, O) pri ich interakciách od zdroja. Druhá anomália, nadbytok napr. Sc, V, Mn je tvorený fragmentami Fe. Z chemického zloženia možno usudzovať na celkovú dĺžku dráhy od zdroja po miesto registrácie (hrúbku materiálu v  $\text{g/cm}^2$ ). Elektróny predstavujú v nízkoenergetickej časti asi 0,01 toku protónov.

Jestvujú 4 hlavné mechanizmy, ktoré modulujú tok kozmického žiarenia v heliosfére:

a. nabité častice „odpovedajú“ na medziplanetárne magnetické pole vynášané slnečným vetrom - konvekcia,

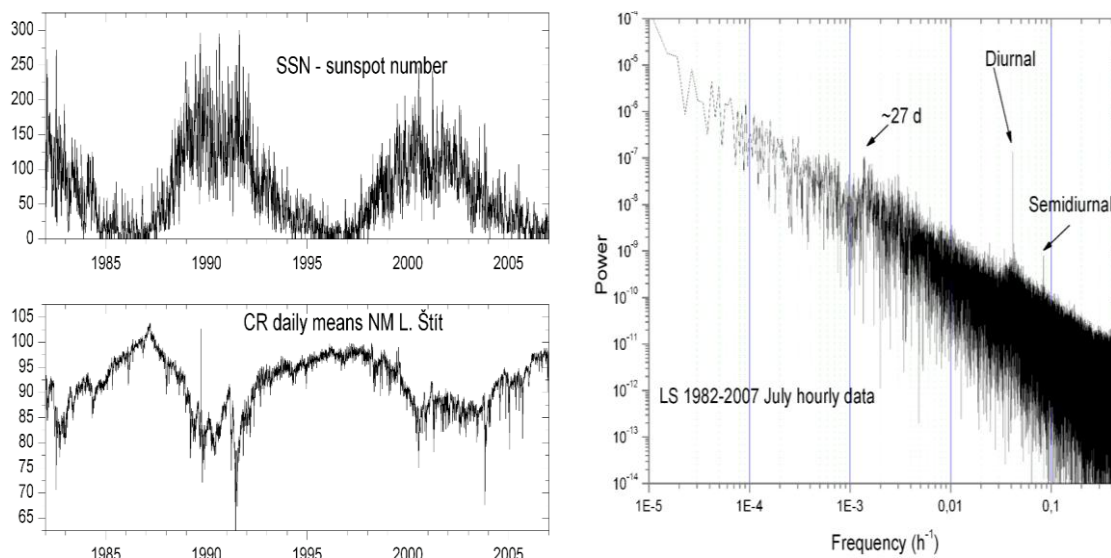
b. častice rýchlo rotujú okolo siločiar magnetického poľa, ktoré v prvom priblížení možno považovať za Archimedove špirály (radiálny výtok plazmy zo slnečného povrchu a rotácia Slnka) a tiež sa pohybujú paralelne k nim. Nehomogenity magnetického poľa zapríčiňujú rýchly rozptyl častíc v priestore nábehového uhlu a tým je formované ich izotropne rozdelenie v referenčnom systéme, ktorý sa pohybuje s plazmou slnečného vetra – difúzia.

c. plazma slnečného vetra alebo expanduje (typické pre jej výtok z povrchu Slnka) alebo je komprimovaná (v prípadoch medziplanetárnych rázových vln alebo rázových vln v okolí planét). V týchto prípadoch sa nehomogenity magnetického poľa alebo od seba vzdalujú, alebo k sebe približujú. Pri mnohonásobných interakciách energetických častíc s takýmito nehomogenitami alebo ich energia klesá (tzv. adiabatické ochladzovanie), alebo rastie (adiabatické urýchľovanie).

d. Pretože pohyb častíc kozmického žiarenia okolo siločiar špirálovitého magnetického poľa je proces rýchlejší než rozptyl (v priestore nábehového uhlu), trajektória častice podlieha tiež driftu, ktorý je zapríčinený veľkoškálovou štruktúrou špirálovitého poľa – drift. Tieto štyri mechanizmy označované ako konvekcia, difúzia, adiabatická zmena energie a drift, ležia vo fyzikálnych základoch modulácie galaktického kozmického žiarenia v heliosfére. Vo vnútornej heliosfére (aj v blízkosti Zeme) je hustota energie častíc kozmického žiarenia podstatne nižšia než je hustota kinetickej energie plazmy slnečného vetra. Tu možno považovať kozmické žiarenie za „autonómnou časticovú entitu“ voči slnečnému vetru. Vo vonkajšej heliosfére sú ale tieto veličiny porovnateľné.

Cyklus slnečnej aktivity ovplyvňuje charakteristiky plazmy slnečného vetra (hlavne rýchlosť, ale aj hustotu a teplotu) ako aj medziplanetárneho magnetického poľa, modulácia kozmického žiarenia súvisí so slnečnou aktivitou. Pre merania na Lomnickom štíte, ktoré uskutočňuje Oddelenie kozmickej fyziky ÚEF SAV v Košiciach (<http://space.saske.sk>) to ukazuje obr.1. Merania v reálnom čase možno nájsť na <http://neutronmonitor.ta3.sk>.

Pre odhady toku kozmického žiarenia v danej fáze slnečného cyklu, priepustnosti do daného miesta, resp. na danú orbitu cez geomagnetické pole, dávku ožiarenia ap. jestvujú modely, tiež pre výpočet odhadu dávky ožiarenia od GKŽ v lietadle.



Obr.1. Modulácia kozmického žiarenia pozorovaná neutrónovým monitorom na Lomnickom štíte v r. 1982-2006 a výkonové spektrum. Denná a 27-denná (rotácia Slnka) variácia sú najvýraznejšími medzi periodickými príspevkami k signálu (pravý obrázok).

### Anomálne kozmické žiarenie

Okrem GKŽ, ktoré prichádza do heliosféry vo forme nabitých častíc, existuje tzv. anomálne kozmické žiarenie. Jeho energetické spektrum je „anomálne“, v oblasti nízkych energií pod 50 MeV/nucl je v energetickom spektre neobvykle vysoké zastúpenie He, N, O. Predpokladá sa, že prichádza do heliosféry ako vzorka neutrálneho medzihviezdneho plynu a tu je urýchľovaná v závislosti od prvého ionizačného potenciálu.

### Slnčné energetické častice. Častice urýchľované v heliosfére

Pri energiách nižších než typické GKŽ ( $\sim 10^7$  až  $\sim 10^{10}$  eV) k produkcii kozmického žiarenia prispieva samotná heliosféra. Ide o urýchľovanie častíc alebo v slnečných erupciách alebo vo výronoch koronálnej látky (coronal mass ejection-CME). Jeho zloženie je podobné zloženiu Slnka. Urýchľovanie prebieha v koróne rázovými vlnami, alebo ak sa magnetické pole rekonfiguruje, dochádza k uvoľňovaniu časti energie magnetického poľa a jeho „využitie“ na kinetickú energiu nabitých častíc. Spektrum slnečného kozmického žiarenia je oveľa mäkkšie ako GKŽ, ale v oblasti nižších energií podstatne prispieva k populácii nabitých častíc.

Efekty urýchľovania častíc v slnečných erupciách do energií, ktoré môžu na zemskom povrchu dať „odpoveď“ vo forme sekundárneho kozmického žiarenia, sa podrobnejšie začali študovať po udalosti v r. 1942, kedy došlo dvakrát za sebou (28.2. a 7.3.) k výpadkom rádiového spojenia v spojitosti so vzrastami intenzity kozmického žiarenia. Zatiaľčo v prvom efekte bola indikácia aj na geomagnetickú búrku, v druhom geomagnetická porucha zaznamenaná nebola. Tieto udalosti sú označované ako GLE (ground level events) č.1 a 2. Zmena ionizácie v ionosfére od slnečného kozmického žiarenia spôsobila zmeny plazmovej frekvencie a tým aj zmeny podmienok šírenia rádiových vln. Doteraz bolo zaznamenaných 70 takýchto efektov. Niektoré z nich boli zaregistrované aj na Lomnickom štíte, t.j. častice boli v týchto udalostiach urýchlené aspoň do energie zodpovedajúcej rigidite (pomer hybnosti a náboja) 4 GV, čo je prahová rigidita pre polohu Lomnického štítu. Prípad najsilnejšieho vzrastu intenzity kozmického žiarenia nameraný na Lomnickom štíte bol GLE 42 dňa

28.9.1989, kedy v 5-minútových dátach bol nárast o 180 % oproti priemernej hodnote pre toto obdobie.

## Zemská magnetosféra, atmosféra a energetické kozmické častice

### Magnetosféra Zeme

Po vypustení prvých umelých družíc Zeme sa ukázalo, že kozmické žiarenie registrované na zemskom povrchu zďaleka nie je jediným typom radiácie, ktorá je prítomná mimo zemskej atmosféry a ktorá môže mať negatívne účinky na technologické systémy osobitne družicové ale aj letecké. Dáta získané z Exploreru-1 a 3 ukázali enormný počet elektricky nabitých častíc zachytených vo vonkajšom zemskom magnetickom poli. Objav bol potvrdený a rozšírený veľmi rýchlo v r. 1958 tak skupinou Van Allena, ako aj nezávisle v rovnakom čase skupinou Vernova experimentami na Sputniku 3. V nasledujúcich rokoch pokračovalo štúdium týchto efektov vedeckými skupinami najmenej v 20 krajinách. V 70. a 80. rokoch minulého storočia sa na analýze meraní podieľal aj ÚEF SAV v Košiciach (<http://space.saske.sk>).

Zem s vlastným magnetickým poľom sa nachádza v prúde plazmy slnečného vetra. Slnečný vietor v okolí Zeme má typickú rýchlosť okolo 400 km/s, hustotu 6 častíc  $\text{cm}^{-3}$  a medziplanetárne magnetické pole (IMF) má v tejto vzdialenosti od Slnka typickú hodnotu indukcie 6 nT. Tieto veličiny sú značne variabilné a súvisia s aktivitou Slnka. Pretože rýchlosť vzájomného pohybu Zeme a plazmy slnečného vetra prevyšuje Alfvénovu rýchlosť v tejto plazme ( $v_a = B \cdot (\mu_0 \cdot \rho)^{-1/2}$ ; B,  $\rho$  sú magnetická indukcia a hustota plazmy), na subsolárnej strane vzniká rázová vlna obdobne prípadu pohybu telesa v neutrálnom prostredí nadzvukovou rýchlosťou. Tá je na rozdiel od neutrálneho prostredia bezzrážková, výmena energie sa sprostredkuje nie binárnymi zrážkami častíc ale elektromagnetickými interakciami. Bližšie k Zemi sa nachádza magnetopauza (na subsolárnej strane na vzdialenosti 8-11 zemských polomerov). Je to povrch, na ktorom je vyrovnaný tlak slnečného vetra s tlakom geomagnetického poľa. Medzi rázovou vlnou a magnetopauzou je turbulentná prechodová oblasť. Vo vnútri magnetopauzy (v magnetosfére) je pohyb nabitých častíc riadený geomagnetickým poľom. V tomto stručnom prehľade budeme uvádzať len fakty dôležité pre energetické nabité častice v magnetosfére v tzv. jednočasticovom priblížení, t.j. predpokladáme, že magnetické, elektrické aj gravitačné polia sú „dané“ z vonku, a pohyb samotných častíc k nim neprispieva.

Geomagnetické pole sa aproximuje superpozíciou polí vnútorných a vonkajších prúdových systémov. Prvé je relatívne stále a mení sa len na dlhých časových škálach, takže pre účely „súčasného“ kozmického počasia ho možno považovať v danej epoche za konštantné. Najjednoduchšie priblíženie je dipólové s osou dipólu odchýlenou približne o 12° od osi rotácie Zeme. V tomto priblížení je možné opis robiť v 2D priblížení, t.j. v priestore (R,  $\lambda$ ), kde R a  $\lambda$  sú vzdialenosť v zemských polomeroch a geomagnetická dipólová šírka. V takomto zjednodušení je  $B = 3,2 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 3 \cdot \sin^2(\lambda))^{1/2} \cdot R^{-3}$  (v Tesla). Rovnice siločiar sú  $R = R_0 \cdot \cos^2(\lambda)$  pre obálku  $L = R_0$ , geomagnetická šírka, na ktorej dipólová siločiar obálky L pretína povrch Zeme, je  $\lambda_E = \arccos(R_0^{-1/2})$ . V reálnom magnetickom poli je tiež možné zníženie rozmernosti problému na 2D, vtedy sa ale zavádza L parameter komplikovanejším spôsobom.

Geomagnetické pole, osobitne na vysokých šírkach a veľkých vzdialenostiach od zemského povrchu, je premenné na krátkych časových škálach. Je to zapríčinené premennými externými prúdovými systémami, ktoré sú odozvou na interakciu plazmy slnečného vetra s geomagnetickým poľom. Pre geoeфекtívnosť porúch v medziplanetárnom priestore je dôležitá orientácia N-S (severo-južnej) zložky IMF. Pri južnej orientácii IMF trvajúcej po

dlhšiu dobu môže vzniknúť pri poruche v medziplanetárnom priestore geomagnetická búrka. V terminológii zvýšenej geomagnetickej aktivity sa uvádzajú 2 základné kategórie, búrka a subbúrka. Búrky, ktoré sú veľmi významné pre kozmické počasie, sú inicializované, ak sa zvýšená energia prenáša zo systému slnečného vetra a IMF do magnetosféry a vedie k intenzifikácii tzv. prstencového prúdu. Ten je možné monitorovať tzv. Dst indexom magnetickej aktivity. Počas magnetickej búrky je porušené geomagnetické pole na povrchu globálne, t.j. aj v oblastiach blízko rovníka.

Zatiaľ čo magnetickej búrky sú pomerne riedko sa vyskytujúcimi javmi, oveľa častejšie sú subbúrky, ktoré z fyzikálneho hľadiska sú veľmi zaujímavé. Aurorálna subbúrka je často sa vyskytujúca atraktívna udalosť hlavne pre ľudí vo vysokých zemepisných šírkach. Na jej počiatku „exploduje“ stabilný, východozápadne orientovaný aurorálny oblúk a vytvára aurorálnu „vypuklinu“. Súčasne s týmito optickými úkazmi sú pozorované zmeny (až do hodnoty 1000 nT, čo predstavuje v aurorálnej oblasti až 2% celkového poľa) na vysokošírkových pozemných magnetometroch, ktoré registrujú ionosferické prúdy (AE – auroral electrojet index odvodený z magnetometrov na vysokých šírkach). Pretože ale subbúrky majú pôvod v magnetosfére, hovorí sa o magnetosferických subbúrkach. Obvykle sú to časové intervaly hodina alebo kratšie, počas ktorých sa veľké množstvo energie uvoľní na zadnej časti, v chvoste magnetosféry. Geomagnetické pole je rekonfigurované a častice môžu byť urýchlené do vysokých energií. Presný mechanizmus, ktorý vedie k uvoľňovaniu energie a jeho spúšťači element, sú stále predmetom výskumu a diskusií.

Ak sú častice v slnečnej erupcii urýchlené do veľmi vysokých energií, môžu pri jadrových interakciách so zvyškovou slnečnou atmosférou produkovať aj neutróny. Tie sú nestabilné a k Zemi môžu prísť s dostatočne vysokou pravdepodobnosťou, ak majú vysokú kinetickú energiu. Prvý prípad pozorovania odozvy od slnečných neutrónov na slnečnom povrchu bol v erupcii 3. júna 1982 v koincidencii s družicovým meraním E.L. Chuppa (gama žiarenie vysokých energií) pozorovaný v strednej Európe na Jungfraujoch a na Lomnickom štíte. Častice nižších energií, ktoré sú urýchlené v slnečných erupciách, sú registrované na družiciach, resp. kozmických sondách.

### Pohyb častíc v magnetosfére

V zemskej magnetosfére sa nachádzajú nabité častice vo veľmi širokom intervale energií od od kinetickej energie  $< 1\text{eV}$  (ionosferická plazma) po  $> 10^{12}\text{ eV}$  (kozmičné žiarenie). Ich dynamika závisí tak od energie a náboja častíc a od magnetických a elektrických polí (osobitne pre vysoké energie), ale aj od hustoty ich toku, ktorá môže spôsobovať zmenu napr. magnetických polí, čo je osobitne prípad nízkych energií.

Klasifikáciu nabitých energetických častíc je možné robiť podľa pomeru charakteristických rozmerov ich trajektórií ( $d$ ) ku rozmeru magnetosféry ( $d_m$ ) do dvoch skupín:  $d > d_m; d \ll d_m$  kde  $d$  je v kvázihomogénnom magnetickom poli rovné Larmorovmu polomeru otáčania okolo siločiar t.j.  $d = p_{\perp} / qB$ , kde  $p_{\perp}$ ,  $q$ ,  $B$  sú hybnosť častice kolmo ku magnetickému poľu indukcie  $B$  a jeho elektrický náboj. Pre pohyb častíc v dipólovom poli je užitočným parametrom  $l_s$  (Störmerova dĺžka) definovaným pre časticu s hmotnosťou  $m$  určená ako  $l_s = (\mu_0 \cdot M \cdot |q| / (4 \pi m v))^{1/2}$ . V súčasnosti je dipólový magnetický moment Zeme  $M \cdot 8.1 \times 10^{22}\text{ A.m}^2$ . Fyzikálny význam je tento: polomer zakrivenia dráhy nabitých častíc je malý v porovnaní so vzdialenosťou do centra Zeme ( $r$ ), ak Störmerova dĺžka častice je väčšia ako táto vzdialenosť ( $l_s > r$ ). V dipólovom poli jestvuje jedna kruhová periodická trajektória častice v rovníkovej rovine, a to taká, pre ktorú polomer je rovný Störmerovej dĺžke. Pre opis trajektórie  $l_s \gg d_m$  sa používa poruchová teória. Takto sa opisujú častice zachytené v radiačných pásoch a magnetosferické plazmové populácie – priblíženie systému vodiaceho centra (GCS). Ten je použiteľný, ak v každom okamihu môžeme definovať

(pohybujúci sa) referenčný systém, v ktorom pozorovateľ vidí časticu na periodickej orbite kolmo k  $\mathbf{B}$  s jedinou periodicitou a počas aspoň jedného úplného cyklu. Ak nie je potrebné poznať fázu pohybu, stačí opísať pohyb vodiaceho centra okolo ktorého častica rotuje.

### Zachytené častice v magnetosfére

Tromi adiabatickými invariantmi možno opísať častice radiačných pásov. Cyklickými pohybmi sú tu rotácia okolo siločiar, kmity medzi zrkadlovými bodmi odrazu na severnej a južnej hemisfére a azimutálny drift častíc okolo Zeme. Historicky sa zaužívali označenia radiačných pásov. Vnútorý pás je charakteristický prítomnosťou protónov a elektrónov vysokých energií. Je relatívne stály. Medzera medzi pásmi a vonkajší pás sú značne premenlivé. Skúmanie mechanizmov zdrojov, transportu, výmeny energie častice-vlny a straty a dôsledky (napr. vysypávanie do atmosféry) sú stále aktuálne. Najväčšie zmeny sú na veľkých šírkach. Častica sa z režimu stabilného záchytu uvoľní, ak sa pri jej pohybe nezachováva niektorý adiabatický invariant, tj, ak na ňu pôsobí sila premenlivá na časovej škále zrovnateľnej s periodicitou príslušného cyklického pohybu. Napr. v prípade rotácie okolo siločiar môže dôjsť k rezonancii s vlnou, ktorej fázová rýchlosť je blízka rýchlosti kmitavého pohybu častice pozdĺž siločiar a ktorej frekvencia je blízka gyrofrequencii častice, pričom vektor jej elektrického poľa sa otáča rovnakým smerom ako rotuje častica okolo siločiar – cyklotrónová rezonancia. V tom prípade dochádza k tzv. vysypávaniu častíc do atmosféry (nábehový uhol nedosiahne  $90^\circ$  dostatočne vysoko nad atmosférou). Pre odhady radiácie od radiačných pásov Zeme jestvujú na základe doterajších meraní štandardné modely, ktoré možno použiť na zistenie odhadov toku, energetického spektra a dávok ožiarenia na družiciach lietajúcich v zemskej magnetosfére.

Nielen upresňovanie a limity použitia modelov zachytenej radiácie sú aktuálne. Tiež pôvod a mechanizmy formujúce radiačné pásy sú stále v strede záujmu. Nedávno na základe analýzy zriedkavého prípadu poruchy v medziplanetárnom prostredí a v magnetosfére, kedy vonkajší radiačný pás bol takmer vyprázdnený a začal sa formovať nový radiačný pás blízko Zeme, bolo ukázané, že urýchľovanie radiálnou difúziou (prenos častíc vstupujúcich do magnetosféry s nízkou energiou postupne na nižšie obálky L pri zachovaní adiabatického invariantu vedie k rastu energie ako  $L^{-3}$ ) ustanovené dávno, nie je adekvátne pozorovaniam. Naopak, elektróny sú urýchľované účinnejšie elektromagnetickými vlnami s frekvenciami niekoľko kHz a to o tri rády kinetickej energie na časovej škále 1-2 dni, čo objasňuje pozorovania nového radiačného pásu. Nakoľko sú v súčasnosti aktuálne výskumy iných planét, môžu byť otázky urýchľovania častíc do vysokých energií vlnami dôležité aj pre Jupiter, Saturn a ďalšie astrofyzikálne objekty s vlastným magnetickým poľom.

### Prechod kozmického žiarenia magnetosférou

Užitočným priblížením filtračných účinkov geomagnetického poľa na kozmické žiarenie je v dipólovom priblížení a bez uvažovania zemskeho tuhého telesa Störmerova prahová rigidita  $R_s$ . Rigiditu častice  $R$  s kinetickou energiou pripadajúcou na 1 nukleón  $T_n$  a s hmotnostným a nábojovým číslom  $A$ , resp.  $Z$ , možno vyjadriť  $R = (A/Z) \cdot (T_n \cdot (T_n + 2M))^{1/2}$ , kde  $M$  je pokojová energia protónu. Pre vysokoenergetické protóny je rigidita (v GV) adekvátne ich energii (v GeV). Pre nízke energie a rôzne nábojové stavy energetických iónov ťažších prvkov ( $Z$ ) sú to veličiny značne odlišné.  $R_s$  označuje rigiditu, nižšie ktorej nijaká častica nedosiahne polohy  $(r, \lambda)$  v systéme s počiatkom v centre dipólu, ak do dohto miesta prichádza zo smeru  $(\varepsilon, \xi)$ .

$$R_s = (M \cdot \cos^4(\lambda)) / \{r^2 \cdot [1 + (1 + \cos^3(\lambda) \cdot \cos(\varepsilon) \cdot \sin(\xi))^{1/2}]^2\},$$

kde  $M$  je dipólový moment a má pre súčasnosť v tomto zápise normalizovanú hodnotu 59.6, ak  $R_s$  je vyjadrené v GV,  $\lambda$  je geomagnetická šírka,  $r$  vzdialenosť od dipólu v zemských polomeroch,  $\varepsilon$  je azimutálny uhol meraný v smere pohybu hodinových ručičiek od geomagnetického východu (pre kladne nabitú časticu) a  $\xi$  je uhol od lokálneho zenitového smeru v dipólovom súradnom systéme. Dipólové pole je hrubou aproximáciou poľa geomagnetického. Aj keby sme ho považovali za správne, nie je hranica rigidít daná  $R_s$  jedinou. Niektoré trajektórie, osobitne nízkorigiditné blízko  $R_s$ , sú komplikované. Výpočty (používa sa metóda numerického riešenia pohybovej rovnice častice s obráteným znamienkom náboja a obráteným smerom vektora rýchlosti „pustená“ z bodu nad detektorom v modelovom poli, čo je ekvivalentné obráteniu času a sledovaniu reálnej častice) ukazujú, že predtým než častica vstúpi nad dané miesto do atmosféry napr. z vertikálneho smeru, by musela prejsť oblasťou, kde je tuhé teleso Zeme. Jej zavedením do výpočtu vzniká zložitá štruktúra dovolených a zakázaných rigidít pre dané miesto pozorovania hoci len zo zenitu. Spätnou numerickou integráciou pohybu sa určujú tzv. asymptotické smery, t.j. dĺžka a šírka, z ktorej častica prichádzala pôvodne spoza magnetosféry, kým dosiahla miesto nad detektorom. Tieto dĺžky a šírky, ktoré závisia od rigidity častice, sa obvykle zakresľujú na geografickú mapu.

### **Prechod kozmických energetických častíc atmosférou**

Jestvujú tri základné komponenty sekundárneho kozmického žiarenia. Primárny protón interaguje v hornej atmosfére ( $l \sim 120 \text{ g/cm}^2$ ). Krátka doba života  $\pi^0$  dáva vznik elektromagnetickej kaskáde (mäkká komponenta). Nukleóny (nukleónová komponenta) sa podieľajú na jadrových interakciách.  $\pi^+$  a  $\pi^-$  dávajú vznik zodpovedajúcim miónom s relatívne dlhou dobou života. Tie tvoria dominantnú časť sekundárneho žiarenia na úrovni mora (tvrdá zložka). Tvrdá, elektromagnetická a mäkká komponenta sekundárneho kozmického žiarenia majú rôzny profil v atmosférickej hĺbke. Elektromagnetická zložka je dominantná v hornej atmosfére, zatiaľčo tvrdá komponenta má podstatne pomalší pokles intenzity s hrúbkou atmosféry smerom k Zemi.

### **Vplyvy kozmického počasia na technologické systémy, nepriame vzťahy kozmického žiarenia ku kozmickému**

#### **Kozmické počasia**

Fyzikálne procesy inicializované z kozmu, ktoré ovplyvňujú blízke okolie Zeme ako aj zemský povrch, sú známe dávno. Jedným z nich sú polárne žiare, o ktorých sú záznamy minimálne 1000 rokov. Znalosti o variabilite slnečnej činnosti a o ich efektoch na Zem sú veľmi dôležité, nakoľko Slnko ovplyvňuje takmer všetky aspekty nášho každodenného života. Jedným zo zdrojov znalostí o variabilite slnečnej aktivity sú pozorovania polárnych žiar. Priame systematické pozorovania Slnka, osobitne slnečných škvŕn, jestvujú približne od začiatku 18. storočia. Počnúc rokom 1715 sa datujú počiatky pozorovaní spojených so slnečnou korónou pri zatmení. Priame merania zemského magnetického poľa sa začali rokom 1836. Na území Slovenska jestvujú najdlhšie intervaly pozorovaní geomagnetického poľa v Hurbanove.

Vonkajšie fyzikálne podmienky sa v histórii sledovali zmenami magnetického poľa. História geomagnetizmu, t.j. priamych pozorovaní magnetického poľa Zeme, je stará asi 400 rokov. Geomagnetická veda začína publikáciou Williama Gilberta z r. 1600, ktorá ukazuje, že Zem predstavuje magnet. Prvá mapa deklinácie geomagnetického poľa pochádza od Edmunda Halleya zo začiatku 18. storočia. Zemské magnetické pole má aj náhle zmeny, ktorú majú následky pre atmosféru aj pre zemský povrch.

Geomagnetické búrky, pojem po prvý krát použitý začiatkom 19. storočia Alexandrom von Humboldtom, sú jedným z najsilnejších prejavov zmien fyzikálnych podmienok v blízkom okolozemskom prostredí, ktoré sú dlhodobo predmetom výskumu svojich účinkov tak na technologické systémy ako aj na biologické objekty. Od mája 1806 do júna 1807 von Humboldt pozoroval, či a ako sa pohybuje strelka kompasu. Dňa 21. decembra 1806 v Berlíne pozoroval neobyčajne silné zmeny orientácie strelky kompasu a tú istú noc videl polárnu žiaru. Ráno polárna žiara zmizla a magnetické zmeny zmizli tiež. Jednou z najsilnejších geomagnetických búrok bola búrka z 2. septembra 1859, kedy v Bombay bol v hodinových hodnotách horizontálnej zložky magnetického poľa zaznamenaný pokles o 1600 nT. Treba poznamenať, že toto bola prvá udalosť inicializovaná z vonkajšieho priestoru, v ktorej bola jednoznačne ukázaná súvislosť aurorálnej aktivity a elektrického poľa. Toto bolo umožnené nielen meraniami magnetometrov na zemskom povrchu, ale prejavilo sa aj na značnej časti rozsiahlej telegrafnej siete, ktorej chod bol po niekoľko hodín silne narušený. Niektoré telegrafné vedenia mali primeranú dĺžku a orientáciu na to, aby sa v nich pozoroval geomagneticky indukovaný prúd vznikajúci v dôsledku fluktuujúceho geomagnetického poľa, čo spôsobilo poruchy komunikácie.

Krátkodobé poruchy zemského magnetického poľa sú kauzálne spojené s fyzikálnymi zmenami na povrchu Slnka. Objav slnečných škvŕn, oblastí, v ktorých je teplota slnečného povrchu podstatne nižšia než je priemerná teplota fotosféry, a ktoré sa javia pozorovateľovi ako tmavšie miesta ako okolie, patrí Galileovi v r. 1610. Ich povahu objasnil G.E. Hale až v r. 1908, keď ukázal, že v týchto oblastiach je silné magnetické pole (hodnota asi 3000 krát vyššia než indukcia magnetického poľa na zemskom povrchu), ktoré značne prevyšuje typické hodnoty poľa v slnečnej fotosfére). Plochy slnečných škvŕn sú voči slnečnému povrchu veľmi malé, sú to ale oblasti s rozsahom porovnateľným so zemským povrchom. V r. 1843 Heinrich Schwabe detailným a dlhodobým pozorovaním počtu škvŕn zistil periodickú variáciu ich početnosti s periodou okolo 11 rokov. Rudolf Wolf skompiloval predošlé záznamy o slnečných škvŕnách a podľa toho sa mu podarilo zrekonštruovať cykly slnečnej aktivity v čase dozadu po rok 1745. Iné postupy dovolili predĺžiť časové rady počtu slnečných škvŕn dozadu až k počiatku 17. storočia. Počet slnečných škvŕn sa ako miera slnečnej aktivity používa dodnes. V súčasnosti je slnečná aktivita nízka, je to v období blízko slnečného minima. Terajší, 24. cyklus slnečnej aktivity, začal v januári 2008. V dobe, kedy bola pozorovaná extrémne silná zmena zemského magnetického poľa v septembri 1859, Richard Carrington pozoroval slnečné škvŕny. Dňa 1. septembra 1859 v ranných hodinách videl nezvyčajne veľkú skupinu slnečných škvŕn. Náhle potom spozoroval dva oslnivé korálky v bielom svetle nad oblasťou slnečných škvŕn, ktoré sa náhle zosilňovali a rýchlo (v čase niekoľko desiat sekúnd) sa menili. Pozoroval slnečnú erupciu. Porovnaním s následnou geomagnetickou búrkou bolo poukázané na spojitosť medzi zmenami na slnečnom povrchu a poruchou geomagnetického poľa. Geomagnetické búrky majú viaceré negatívne následky na technologické systémy. Schlegel uvádza prehľad najsilnejších geomagnetických búrok minulého storočia spolu s informáciami o niektorých ich účinkoch na ionosféru a komunikačné problémy. Jestvuje niekoľko indexov pre posudzovanie aktivity geomagnetického poľa.

Zaujímavé je porovnanie hlásení o poruchách technologických systémov počas dvoch magnetických búrok na začiatku storočia (1903) a blízko jeho konca (1989). V prvom prípade boli hlásené poruchy na telegrafickom systéme, komunikácia bola počas niekoľko hodín takmer celkom porušená a hovorí sa o indukcii 675 V v drôtoch bez batérie k nim pripojených. Podstatne rozsiahlejšie sú informácie o následkoch porovnateľnej búrky v r. 1989. Možno ich rozdeliť do piatich skupín:

a. poškodenia družíc (napr. zmena dráhy nízkoorbitálnej družice SMM, poruchy na elektronike na 4 družiciach),

b. komunikácie (výpadky v rádiového spojenia južných oblastí USA s rôznymi miestami na svete, správy dialničnej kontroly v Kalifornii rušili lokálne prenosy v Minnesote, káble pod vodou v Atlantickom a v Tichom oceáne zaznamenali značné nárazy napätia),

c. navigácia (pobrežná ochrana v USA hlásila viaceré poruchy navigačného systému LORAN - Long Range Navigation – pozemný navigačný systém nf rádiových prenosových zariadení využívajúci viacero vysielateľov na určenie pozície a rýchlosti prijímača – obvykle využíva 90 – 110 kHz, navigácia lodí v blízkosti Austrálie využívajúca signály navigačných družíc bola narušená),

d. elektrické rozvodné siete (výpadok elektrickej energie v Quebecu pričom 6 miliónov ľudí zostalo počas 9 hodín bez elektriny, výpadok rozvodného 130 kV systému vo Švédsku, poruchy viacerých rozvodných systémov bez úplného výpadku),

e. iné (v severovýchodnej časti USA boli niektoré mikročipové zariadenia nefunkčné). *Rozvoj nových technologických systémov, spolu s otázkami ich spoľahlivosti, viedli k zavedeniu pojmu „kozmicke počasie“ a k systémovému multidisciplinárnemu prístupu k týmto otázkam v medzinárodnom merítku.*

**Kozmické počasie** zahŕňa podmienky na Slnku a v slnečnom vetre, magnetosfére, ionosfére a termosfére, ktoré môžu ovplyvniť funkčnosť a spoľahlivosť kozmických aj pozemných technologických systémov a môžu ohroziť zdravie a život ľudí (definícia J. Freemana). V rámci európskeho projektu COST 724, na ktorom sa účastnil aj ÚEF SAV Košice, bola prijatá nasledujúca definícia: Kozmické počasie je fyzikálny a fenomenologický stav prirodzeného kozmického prostredia. Príslušná vedná disciplína má za cieľ prostredníctvom pozorovaní, monitorovania, analýzy a modelovania pochopiť a predvídať stav Slnka, medziplanetárneho priestoru a prostredia v okolí planét, ako aj poruchy, ktoré buď sú alebo nie sú hnané Slnkom, ktoré tieto prostredia ovplyvňujú. Zaoberá sa tiež predpovedaním a skúmaním možných dopadov na biologické a technologické systémy.

### Vplyvy na komunikáciu

Ionosféra Zeme má na šírenie rádiových vln podstatný vplyv. Jej stav je ovplyvňovaný slnečnou a geomagnetickou aktivitou. Chémia atmosféry určuje ionosferickú štruktúru, ktorá je všeobecne delená na vrstvy označované D, E, F1 a F2. Extrémne UV žiarenie zo Slnka je hlavným faktorom, ktorý ionosféru formuje. Vrstvy F sú najdôležitejšie pre komunikáciu. Pre šírenie elektromagnetických vln v plazmovom prostredí ionosféry je dôležitý index lomu  $n^2 = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$ , kde  $\omega_p = (n_e \cdot e^2 / \epsilon_0 \cdot m_e)^{1/2}$  je plazmová frekvencia závislá od koncentrácie elektrónov. Pre frekvencie nižšie ako je plazmová je  $n$  imaginárne a takáto vlna sa v prostredí nešíri. Pre  $\omega \gg \omega_p$  sa index lomu blíži 1, čo zodpovedá šíreniu sa elektromagnetickej vlny vo vákuu. V prípade rovnosti frekvencie vlny plazmovej frekvencii je  $n=0$ . V tomto prípade sa vlna v prostredí nešíri, ale od daného miesta (výšky) sa odráža. To je dôležité napr. pre šírenie krátkych vln na veľké vzdialenosti. Ale aj pre vysoké frekvencie v GHz oblasti zmeny koncentrácie elektrónov majú vplyv. Dôležitou ionosferickou veličinou je celkový elektronový obsah  $TEC = \int_p n_e ds$ , kde integrácia sa berie cez dráhu signálu. V období slnečného

minima, kedy UV žiarenie je zo Slnka slabšie a koncentrácia elektrónov nízka, sú odrážané od ionosféry iba signály nízkofrekvenčné. V období slnečného maxima je situácia iná a odrážať sa môžu aj frekvencie vyššie. Koncentrácia elektrónov a šírenie HF signálov závisí samozrejme aj od miestneho času, šírky a ročného obdobia. Výpadky spojenia sú zapríčinené slnečnými erupciami v röntgenovom žiarení. Zvýšená ionizácia, kombinovaná s vyššou hustotou neutrálnych častíc, vedie k absorpcii signálu v D vrstve počas silných erupcií. Ešte pred kozmickou érou boli efekty, dnes označované za kozmické počasie, pozorované v technologických systémoch dôležitých pre komunikáciu. Prvá zmienka o poruchách na telegrafných systémoch (galvanometer zaznamenávajúci odchyľky s meniacim sa

znamienkom na kábli z Derby do Birminghamu) pochádza z r. 1849. Systematická zmena, zistená a súvisiaca s miestnym časom, bola pravdepodobne prvým meraním dennej komponenty geomagnetickým poľom indukovaného prúdu na zemskom povrchu, aj keď takto meranie ešte interpretované nebolo. Efekty vonkajšieho fyzikálneho stavu na bezdrôtové transkontinentálne spojenie boli spomenuté už v práci Marconiho z r. 1928. Marconi uvádzal, že prakticky všetky prípady strácajúcich sa rádiových signálov koincidovali s časovými úsekmi, kedy boli pozorované veľké slnečné škvrny, intenzívne polárne žiare a geomagnetické búrky. Okrem už uvedených satelitných anomálií spôsobených energetickými kozmickými časticami sú dôležité vplyvy ionosféry. Jedným z nich sú tzv. scintilácie. Ide o rýchle fluktuácie intenzity transionosferického signálu (družica-Zem). Spôsobujú dodatočnú nízkofrekvenčnú šumovú zložku k užitočnému signálu. Namiesto homogénnej vrstvy sú v niektorých oblastiach ionosféry miesta so zvýšenou, resp. zníženou koncentráciou elektrónov. Tieto neregularity sa vyskytujú v dvoch oblastiach – polárnej (tam sú spôsobované časticami uvoľňovanými z oblastí záchyty – ich vysypávaním do atmosféry – vyskytujú sa v ľubovoľnom miestnom čase s tendenciou zosilnenia v noci a počas zvýšenej magnetickej aktivity) a rovníkovej (význačne závislé od miestneho času – dajú sa predvídať, majú periodicity rovnaké ako extrémne UV a röntgenové žiarenie zo Slnka).

### Vplyvy na navigáciu

Pre elektromagnetické vlny využívané v globálnych navigačných družicových systémoch (GNSS) akými sú GPS, GLONASS alebo európsky Galileo, sú veľmi dôležité zmeny stavu ionosféry. Pri používaní frekvencií v oblasti 1,2-1,6 GHz môže ionosféra spôsobiť oneskorenie signálu zodpovedajúce chybám vzdialenosti až 100 m. Iónosferická chyba 1. rádu je 1-100 m pre frekvencie užívané v systéme Galileo. S použitím iónosferického modelu možno chybu redukovať na polovicu. V prvom priblížení je  $d$  (iónosferické oneskorenie pozdĺž lúča) úmerné  $TEC$  a úmerné  $f^{-2}$  a chyba môže byť znížená lineárnou kombináciou navigačných signálov na dvoch odlišných frekvenciách. Kvôli disperzii iónosféry použitie tretej alebo ďalšej frekvencie zlepšuje presnosť. Odhad  $TEC$  možno spraviť s využitím meraní na viacerých družiciach a konverziou šikmých  $TEC$  meraní na vertikálne.  $TEC$  sa mení jednak so slnečným cyklom ale aj krátkodobo počas geomagnetických porúch.

### Vplyvy na pozemné systémy

Okrem prúdových systémov v ionosfére počas geomagnetických porúch vznikajú aj prúdové systémy v technologických zariadeniach na zemskom povrchu. Fyzikálne ide o geomagneticky indukované prúdy (GIC), ktoré možno opísať základnými zákonmi elektromagnetizmu. Porucha kozmického počasia dáva vznik intenzívnym a rýchlo sa meniacim prúdovým systémom v ionosfére, ktoré s využitím Biot-Savartovho zákona spôsobujú časovo premenné magnetické polia pozorované ako geomagnetické subbúrky alebo búrky, čo podľa Faradayovho indukčného zákona je vždy sprevádzané elektrickým poľom. Geomagnetické poruchy a geoelektrické pole na zemskom povrchu nielen primárne závisia od priestorových prúdov, ale tiež sekundárne sú ovplyvnené prúdmi vyvolanými vo vnútri zemského telesa. Hlavne pre elektrické pole je sekundárny príspevok dôležitý. Horizontálna zložka geoelektrického poľa vyvoláva na technologických vodivých sieťach ohmické prúdy. K opisu sa používajú Kirchhoffove zákony. Geoelektrické prúdy sú všeobecne rotačné a nemožno hovoriť o potenciáloch na rôznych miestach zemského povrchu. Zmeny magnetického poľa  $dB/dt$  sú veľké hlavne na vysokých šírkach a týmto spôsobom indukované prúdy sú tam preto značné. Prejavujú sa napr. v rozvodných systémoch v Kanade, severských krajinách Európy a inde. Hlásené sú z období extrémne silných geomagnetických búrok. Najsilnejší hlásený prúd bol na švédskom rozvodnom systéme v búrke v apríli 2000 s hodnotou 320 A.

Iným druhom poruch pozemných systémov počas geomagnetických búrok sú poškodenia plynovodov, resp. ropovodov. Transport veľkého množstva kvapalín alebo plynov pod zemou alebo pod vodou, či dokonca na zemskom povrchu vyžaduje pevné konštrukcie odolné nárazom. Poškodenie ale môže potom vzniknúť z korózie oceľových rozvodov. Preto sú pokryté izolačným náterom a pripojené k špeciálnym zariadeniam (katodové ochranné rektifikátory). Cez malé dierky na pokryve sa môže oceľ dostať do kontaktu s pôdou, vodou alebo vlhkým vzduchom a korodovať. Týmto elektrochemickým reakciám možno brániť záporným napätím udržiavaným na oceli (katóde) voči okolitej zemine (anoda). Možno to spraviť spojením záporného výstupu jednosmerného zdroja k potrubiu a kladného výstupu k anodovému zariadeniu v pôde, takže prúd tečie od anody k potrubiu. Ochranný systém tak udržiava potenciál potrubia na úrovni od  $-0,85$  do  $-1,35$  V. Časovo premenné magnetické polia vytvárajú elektrické prúdy na dlhých vodivých potrubiach, čo môže spôsobiť napäťové zmeny na ochranných rektifikátoroch. Počas geomagnetických búrok tieto variácie môžu spôsobiť zmenu potenciálu mimo dovolenú úroveň a tým redukovať dobu života potrubia.

### **Kozmické žiarenie ako prediktor geomagnetických a radiačných búrok. Záver**

V súčasnosti jestvujú monitorovacie dáta o stave kozmického počasia z družicových aj pozemných meraní v reálnom čase. Tiež pokročili predpovedné metódy. Jeden zdroj informácií, ktorý možno v predikcii udalostí kozmického počasia využiť a ktorého relevancia pre schémy predikcie sa v súčasnosti skúma, je kozmické žiarenie merané pozemnými zariadeniami. Nepriame vzťahy kozmického žiarenia nízkych energií ku kozmickému počasiu spočívajú v tom, že primárne častice majú veľkú strednú voľnú dráhu pre interakciu s IMF, veľký gyrorádus a pritom vysokú rýchlosť. Preto ich anizotropia, resp. úroveň fluktuácií odráža distribúciu IMF v medziplanetárnom prostredí a informácia o jeho redistribúcii (napr. pri šírení CME, ktorý je „prekážkou“ pre kozmické žiarenie už niekoľko hodín predtým než oblak príde na orbitu Zeme a vyvolá geoeftívne javy) je pozorovateľná zo zemského povrchu detektormi, ak pokrývajú rôzne asymptotické smery. Takýmto zariadením je napr. systém neutrónových monitorov vo vysokých šírkach „Spaceship Earth“, resp. mezónové smerové ďalekohľady. V rámci EÚ sa začala tvoriť dátová báza neutrónových monitorov s vysokým rozlíšením v reálnom čase, s účasťou aj meraní ÚEF SAV na Lomnickom štíte. Ak má meranie neutrónovými monitorami vysoké časové rozlíšenie a dostatočnú štatistickú presnosť, možno ich využiť ako výstrahu pre začiatok radiačných búrok niekoľko minút až desiatok minút predtým, než je vytvorená štandardná výstraha podľa družicových meraní. Problémom v zmysle využitia iba kozmického žiarenia pre predikcie geomagnetickej búrky je relatívne veľká variabilita času medzi nástupom anizotropie kozmického žiarenia a začiatkom geomagnetickej búrky, čo súvisí s geometriou CME a jeho rozmermi, smerom a rýchlosťou jeho šírenia voči Zemi a s „magnetickým napojením“ meraní (asymptotickými smermi) voči hraniciam CME v medziplanetárnom prostredí.

### **Literatúra**

1. Kudela, Karel - Baláž, Ján. Fyzikálne efekty v kozme a ich vplyvy na technologické systémy. In DUSZA, Ján. Progresívne materiály a technológie. - Košice : Ústav materiálového výskumu SAV, 2008. ISBN 978-80-968543-6-3. 1. časť, s. 85-124.
2. Dubinský, J. – Kudela, K.: Kozmické žiarenie. Veda, Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 1984
3. Kudela, K., M. Storini, M.Y. Hofer, A. Belov, Cosmic Rays in Relation to Space Weather, Space Science Rev., 93, p. 153-174 (2000)