

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Václav Petržílka

Objev dvou pásem kosmického záření kolem Země s mimořádně vysokou intenzitou

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 5 (1960), No. 1, 53--64

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137077>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1960

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>

FYSIKA

OBJEV DVOU PÁSEM KOSMICKÉHO ZÁŘENÍ KOLEM ZEMĚ S MIMOŘÁDNĚ VYSOKOU INTENSITOU¹⁾

V. PETRŽÍLKA

Během mezinárodního geofyzikálního roku překvapily přímé účastníky výzkumných prací a širokou veřejnost zprávy, že jak aparatury, umístěné v sovětských družicích a raketách, tak zařízení v některých raketách, vypuštěných v USA, zaznamenaly ve vzdálenosti od Země, přesahující 1000 km, zvýšení intenzity kosmického záření o několik řádů ve srovnání s intenzitou tohoto záření na povrchu zemském nebo ve výšce kolem 100 km nad zemí. Poněvadž výsledky, přednesené na Mezinárodní konferenci o kosmickém záření v červenci 1959 jednak profesorem S. N. Vernovem a jeho spolupracovníky ([1] až [12]), jednak profesorem J. A. Van Allenem ([13] až [19]), umožňují učinit si o věci již dnes konkrétní obraz, pokládám za účelné podat o tomto jevu zprávu na základě přednášek moskevské konference a citované literatury.

Objev kosmického záření umožnily, jak známo, balony, které vynesly příslušná měřicí zařízení do výšek několika kilometrů. Výšková měření tehdy neznámého záření nezvratně ukázala, že jeho intenzita s výškou roste a že tudíž toto záření je mimozemského původu. Bylo proto nazváno kosmickým zářením (dále KZ). Jakmile se balony staly dokonalejšími a mohly proniknout ve stratosféře až do výše 30 km, bylo nalezeno maximum intenzity KZ, které podle zeměpisné šířky leží mezi deseti až dvaceti kilometry nad povrchem zemským [2]. I když některé klasické teoretické práce Poincarého, Störmera a Alfvéna poukazyvaly na možnost vodivých pásem (zón) kolem Země, zdálo se, že po překročení zmíněného maxima klesá intenzita KZ na hodnoty primární složky KZ, jejíž částice — hlavně protony — přilétají k naší Zemi ve všech směrech z vesmíru [20].

Teprve aparatury druhé sovětské družice Země zaznamenaly, počínaje výškou 200 km nad zemí, růst intenzity KZ, který má mezi 400 až 700 km nad zemským povrchem zřetelnou tendenci stoupající [2].

Intenzita KZ se na druhé sovětské družici registrovala dvěma na sobě nezávislými zařízeními, jejichž základní jednotky byly popsány v práci [1]. Každé z těchto zařízení mělo Geigerův-Müllerův počítač délky 100 mm a průměru 18 mm. Množství materiálu, kterým muselo záření projít, bylo asi 10 g/cm². Pracovní napětí u počítačů bylo 400 V a odebíralo se z polovodičového usměrňovače, který byl napájen baterií s napětím 6,5 V. Oba přístroje měly registrační zařízení, vybavená transistory (polovodičovými triodami) a každý z nich měl celkovou spotřebu 0,15 W. Celková váha přístroje i se zdroji napětí

¹⁾ Referát z Mezinárodní konference o kosmickém záření, konané v Moskvě v červenci 1959, na niž byl autor vyslán I. sekcí Československé akademie věd.

byla 2,5 kg. Nepřerušovaný provoz obou aparatur byl zajištěn na 200 hodin. Závislost na výšce byla vyhodnocena tak, že při jednotlivých přeletech téže geografické šířky byl určen poměr intenzity KZ v různých výškách nad zemí k intenzitě KZ na nejmenší výšce přeletu téže geografické šířky. Stanovení intenzity KZ v téže výšce nad povrchem zemským umožnilo zkrleslit čáry téže intenzity, čili isokosmy, do zeměpisné mapy naší Země. Naměřené isokosmy jsou rovnoběžné se zeměpisnými rovnoběžkami. Intenzita KZ na téže výšce nad povrchem zemským roste se zeměpisnou šířkou. Měření, provedená Vernovem a spolupracovníky při téže výšce (v práci [2] není její velikost udána) mezi 30° a 150° východní délky, dávají v severních zeměpisných šířkách 43°, 54° a 62° po řadě hodnoty 18, 27 a 36 impulsů za sekundu v počítači popsaných přístrojů. Těmito aparaturami druhé sovětské družice bylo pozorováno dne 7. listopadu 1957 od 4 hod. 36 min. do 4 hod. 49 min. astronomického času nad zeměpisnou šířkou 58° dokonce mimořádné zvýšení intenzity kosmického záření, které během uvedených třinácti minut dosahovalo až 50% původní hodnoty.

S. N. Vernov se svými spolupracovníky se pokusil v práci [3] toto zvýšení intenzity KZ nad povrchem zemským, počínaje výškou 200 km, vyložit tzv. „zemským korpuskulárním zářením“, které se skládá z proudů nabitých částic, pohybujících se podél uzavřených křivek v magnetickém poli Země [3]. Podle této práce se naše Země i její atmosféra stává působením KZ zdrojem neutronů²⁾, které mohou pronikat až do velkých vzdáleností od Země, neboť na ně nepůsobí magnetické pole vzhledem k tomu, že nemají elektrický náboj. Protony a elektrony, které vznikají při rozpadu neutronu, se pohybují podél siločar zemského magnetického pole, které zakřivuje jejich dráhu tím, že na ně působí silou F , jejíž velikost je dána výrazem

$$(1) \quad F = \frac{e_0}{c} \mathbf{v} \cdot \mathbf{H} \sin \Theta .$$

kde Θ je úhel vektoru rychlosti \mathbf{v} částice a vektoru \mathbf{H} zemského magnetického pole, e_0 náboj částice a c rychlost světla. Zachování magnetického momentu částice vyžaduje, aby při jejím pohybu po siločáře zemského magnetického pole byla splněna podmínka

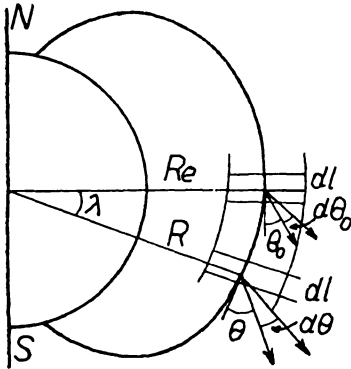
$$(2) \quad \frac{\sin^2 \Theta}{H} = \text{konst.}$$

Po určité době pohybu podél siločar zemského magnetického pole se přiblíží každá z těchto nabitých částic k jednomu ze zemských magnetických pólů. Zemské magnetické pole mění s rostoucí geomagnetickou šířkou λ rychle svůj směr i svou velikost. V důsledku toho bude při přibližování částice k jednomu ze zemských magnetických pólů vzrůstat úhel Θ mezi vektorem rychlosti \mathbf{v} a vektorem zemského magnetického pole \mathbf{H} , až se v určité magnetické šířce λ_{max} stane rovným 90°. V tom okamžiku se nabitá částice začne po své dráze vracet a putuje po téže siločáře zemského magnetického pole k druhému magnetickému pólu. Poněvadž ve velkých výškách mezi 1000 až 3000 km je hustota atmosféry velmi nepatrná, proletí částice na své dráze mezi oběma zmíněnými body obratu nepatrné množství hmoty, řádově 10⁻⁸ až 10⁻¹⁰ g/cm². V důsledku

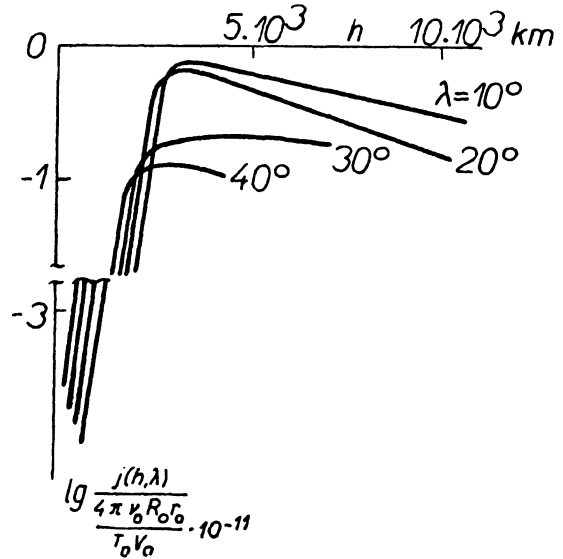
²⁾ Interakce částic primární složky KZ s atomy atmosféry Země je popsána v knize [20].

toho ztrácí pouze nepatrné množství své energie, řádově 10^{-2} až 10^{-4} eV. Protony a elektrony, vzniklé při rozpadu neutronů nesoucích energii větší nebo rovnou 1 MeV, mají proto možnost vykonat za uvedených podmínek 10^8 nebo i více průletů mezi oběma body obratu v oblasti zemských magnetických pólů. Je tedy zřejmo, že v těchto výškách v tomtéž poměru vzroste intenzita toku těchto částic.

Na podkladě těchto úvah vypočítal Š. N. Vernov se svými spolupracovníky [3] počet n_e elek-



Obr. 1. K stanovení počtu n_e elektronů a počtu n_p protonů, vytvořených v trubici za 1 sek nad 1 cm^2 ve vzdálenosti R od středu Země.



Obr. 2. Závislost intenzity $I(h, \lambda)$ „zemského korpuskulárního záření“ na výšce h nad různými geomagnetickými šířkami povrchu zemského.

tronů a počet n_p protonů, vznikajících v celé trubici nad 1 cm^2 zemského povrchu v geomagnetické šířce λ za 1 sek (obr. 1). Pro n_e dostali výraz

$$(3) \quad n_e(\theta_0, R_e) d\theta_0 = R_e \frac{\cos \theta_0 \sin \theta_0}{\tau_0 v_H} d\theta_0 \int_0^{\lambda_{\max}} \frac{n_H(\lambda, R_e) \cos^4 \lambda (4 - 3 \cos^2 \lambda)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{\cos^6 \lambda - \sin^2 \theta_0 (4 - 3 \cos^2 \lambda)}} d\lambda,$$

v němž θ_0 musí splňovat nerovnost $\theta_0 \min \leq \theta_0 \leq \theta_0 \max$, pro jejíž krajní hodnoty platí vztahy

$$(4) \quad \sin^2 \theta_0 \max = \cos^6 \lambda_{\max} / \sqrt{4 - 3 \cos^2 \lambda_{\max}},$$

$$(5) \quad \sin^2 \theta_0 \min = \left(\frac{R_0}{R_0 + h_1} \right)^3 \cos^6 \lambda_1 / \sqrt{4 - 3 \frac{R_0}{R_0 + h_1} \cos^2 \lambda_1}.$$

V těchto výrazech značí R_0 poloměr Země, h_1 , λ_1 souřadnice středu základny zvolené „trubice“ pro geomagnetickou šířku λ_1 a pro výšku h_1 nad povrchem zemským, R_e vzdálenost základny od středu Země, nad níž se v ekvatoriální

rovině nachází zvolená trubice, τ_0 životní dobu neutronu, v_H jeho rychlost, n_H tok neutronů.

Obdobný výraz dostali Vernov a spolupracovníci pro počet protonů n_p :

$$(6) \quad n_p(\Theta_0, R_e) d\Theta_0 = R_e \frac{\cos \Theta_0}{\tau_0 v_H} d\Theta_0 \int_0^{\lambda_{\max}} \frac{n_H(\lambda, R_e, \Theta_1) \cos^7 \lambda (4 - 3 \cos^2 \lambda)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{\cos^6 \lambda - \sin^2 \Theta_0} \sqrt{4 - 3 \cos^2 \lambda}} d\lambda,$$

v němž $n_H(\lambda, R_e, \Theta_1)$ je tok neutronů, letících jednotkou plochy pod úhlem Θ_1 k vektoru H .

Pro celkový tok částic, prolétajících jednotkou plochy v geometrické šířce λ_1 a ve výšce h_1 nad zemským povrchem odvodili vztah

$$j(\lambda_1, h_1) = \frac{\sqrt{4 - 3 \cos^2 \lambda_1}}{\cos^6 \lambda_1} \int_{\Theta_{0 \min}}^{\Theta_{0 \max}} \frac{n(\Theta_0, R_e, v(K) \Theta_0, R_e)}{\cos \Theta_1(\Theta_0, \lambda_1)} d\Theta_0,$$

v němž $n(\Theta_0, R_e, v)$ je počet částic, vznikajících za 1 sek v celé „trubici“, mající na rovníku průřez 1 cm^2 , $K(\Theta_0, R_e)$ je počet průletů částic mezi body obratu na příslušné siločáře zemského magnetického pole.

Intenzita „zemského korpuskulárního záření“ byla v uvedené práci [3] vyhodnocena podle vzorce (7); vyhodnocení je znázorněno na obraze 2 pro různé geomagnetické šířky λ v závislosti na výšce h nad povrchem zemským. Na ose pořadnic je nanášena hodnota výrazu

$$j(h, \lambda) / (4\pi v_0 R_0 r_0 / \tau_0 v_H) = I(h, \lambda), \quad \text{v němž } v_0$$

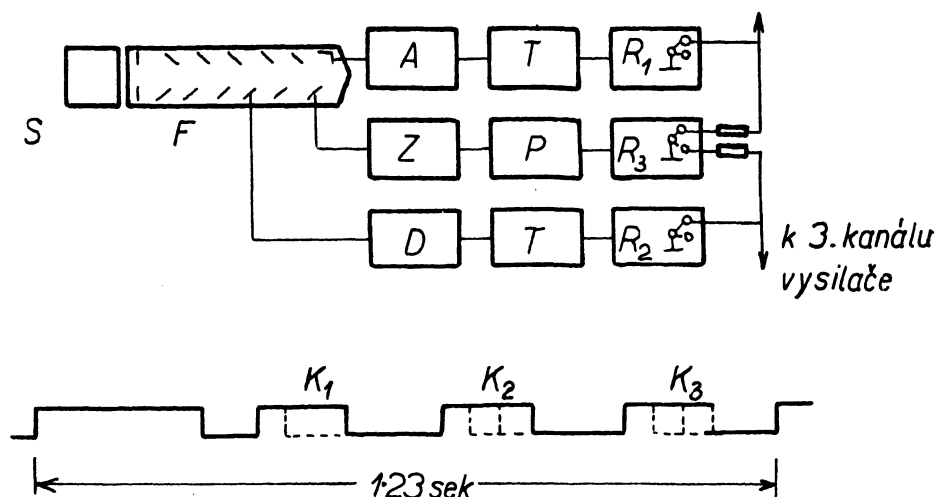
značí tok neutronů, vylétajících na rovníku plochou 1 cm^2 atmosféry, r_0 je úsek dráhy částice mezi dvěma po sobě jdoucími ionisacemi, vyvolanými touto částicí. Na ose souřadnic je nanášena výška h nad povrchem zemským v kilometrech.

I když tu zatím není možno hovořit o kvantitativním souhlasu mezi výpočty a experimenty, které budou dále popsány, přece jen tu jde o zásadní teoretický pokus vysvětlit mimořádně vysokou intenzitu KZ, pozorovanou ve výškách asi 1000 km nad zemí.

Aparatura, umístěná na třetí sovětské družici a vybavená scintilačním počítacem, přinesla další experimentální poznatky o tomto, jevu, zvláště pokud jde o příspěvek elektronů a fotonů k zvýšení intenzity KZ ve výškách, přesahujících 200 km nad povrchem zemským [9]. Její schéma je znázorněno v obraze 3. Jejím účelem bylo měřit a) četnost impulsů, odpovídající energii větší nebo rovné 35 keV, uvolněné v krystalu měřeným zařízením, b) anodový proud fotonásobiče, c) proud dvou dynod fotonásobiče. Jako scintilačního krystalu S bylo použito jodidu sodného NaI(Tl), aktivovaného thaliem, ve tvaru válečku o rozměrech 40mm krát 39 mm. Scintilátor S byl uložen v hliníkovém obalu, takže byl obklopen vrstvou hmoty alespoň 1 g/cm^2 . Katoda fotonásobiče F měla rozměr 40 mm.

Anodový a dynodový proud byly měřeny současně. To umožnilo stanovit celkovou ionisaci, vyvolanou dopadajícím KZ v scintilačním krystalu. Mimo to umožňují výsledky takového měření určit v průměru i energetické spektrum

záření, které ionisaci vyvolalo. Aby bylo možno měřit relativně slabé anodové proudy, byly vyvinuty obvody A , D , pracující na principu nabíjení kondensátoru. Jakmile napětí na kondensátoru dosáhlo hodnoty zápalného napětí neonové výbojky, kondensátor se vybil přes tuto výbojku až k jejímu zhašecímu napětí. Tímto způsobem bylo možno měřit proudy až 10^{-10} A. Impuls, vyvolaný výbojem v neonové výbojce, uvedl v činnost spouštěcí obvod T , který ovládá relé R_1 nebo R_2 . Poloha kontaktů příslušného relé je předávána radiotelegraficky vysílačem „Maják“, pracujícím s frekvencí 20 Mc/s.



Obr. 3. Blokové schéma aparatury a tvar telegrafních signálů. A — obvod pro měření anodového proudu, B — obvod pro měření dynodového proudu, Z — zesilovač, S — scintilační krystal NaI(Tl) , F — fotonásobič, T — spouštěcí obvod, R_1, R_2, R_3 — relé, K_1, K_2, K_3 — signály z prvního, druhého a třetího kanálu.

Aby bylo možno měřit četnost impulsů, byly pulsy, vznikající na poslední dynodě fotonásobiče F (obr. 3), vedeny do dvoustupňového zesilovače Z a odtud do binárního reduktoru impulsů P s redukčním poměrem 4096, jehož diskriminační hladina odpovídala energii 35 keV. Poslední spouštěcí obvod reduktoru ovládá polohu kontaktů příslušného relé. Jako součástí bylo místo elektronek použito polovodičových diod a triod. Celková spotřeba energie byla pouze 0,15 W.

Vysílač „Maják“ vysílal během letu družice trvale. Informace byly předávány tak, že byla měněna doba trvání vysílaných signálů. Bylo používáno druhých a třetích signálů z druhého (K_2) a třetího (K_3) kanálu. Délka signálu závisela na odporu, použitém v příslušném kanálu. Pro odpor $R = 0$ trval signál dobu $\tau = 50$ milisekund, pro $R = 10 \text{ k}\Omega$ bylo $\tau = 100$ milisekund, pro $R = \infty$ bylo $\tau = 150$ milisekund. Změna polohy kontaktů nastala u relé R_1 a R_2 po nahromadění určitého náboje na příslušném kondensátoru, u relé R_3 po zaregistrování určitého počtu pulsů. Intenzita I byla počítána ze vztahu

$$I = \frac{K}{T}, \quad (8)$$

v němž T je doba, v níž je příslušné relé v určité poloze. Byla-li měřena četnost impulsů, bylo $K = K_i = 2048$, byla-li ionisace měřena z velikosti anodového proudu, bylo $K = K_A = 2 \times 10^9$ eV, byla-li měřena ionisace z velikosti dynodového proudu, bylo $K = K_D = 18 \times 10^9$ eV. Veličiny K_A a K_D byly určeny kalibrací aparatury pomocí paprsků gama z radioisotopů rtuti ^{203}Hg , jejichž energie byla 279 keV.

Popsanou aparaturou bylo získáno během obíhání družice mnoho experimentálních výsledků, a to na severní i na jižní polokouli. Jejich analýsa vedla k závěru, že existují dvě pásma (dvě zóny) KZ kolem Země, která vykazují velkou intenzitu.

První z nich bylo pozorováno v geomagnetických šířkách větších než 60° a ve výškách nad 300 km od zemského povrchu. Bylo proto nazváno „polárním pásmem“ (polární zónou). Měření, provedená všemi třemi svrchu uvedenými způsoby dala výsledky, z nichž lze soudit, že toto „polární pásmo“ je tvořeno převážně elektrony s energií řádu 100 keV. Tok částic v tomto pásmu byl odhadnut na 10^3 – 10^4 částic/cm². sterrad. Bylo zjištěno, že roste s výškou.

Druhé pásmo, které bylo nazváno „rovníkovým pásmem“ (rovníkovou zónou), bylo pozorováno ve vzdálenostech asi 1000 km od Země ve shodě s pozorováními Van Allenovými ([13] až [19]) konanými s aparaturami s Geigerovými-Müllerovými počítači, umístěnými v družicích „Explorer I, („1958““ a „Explorer II, („1958““). K prozkoumání tohoto druhého pásma přispělo také pozorování signálů třetí sovětské družice na jižní polokouli, které však Vernov a spolupracovníci dostali poměrně pozdě. Toto „rovníkové pásmo, nepřekračuje geomagnetickou šířku 50° . Byla v něm naměřena střední hodnota ionisace, vyvolaná v scintilačním počítači, o tři řády vyšší, než je ionisace, způsobená primární složkou kosmického záření, což odpovídá intenzitě záření $3 \cdot 10^{12}$ eV/s v tomto pásmu. O energetickém spektru není v práci [9] ještě zmínka.

Vzhledem k velké intenzitě protonů, elektronů a fotonů, opouštějících zemskou atmosféru v důsledku účinků primární složky KZ a vytvářejících pozorovaná pásma KZ vysoké intenzity, nebylo možno z popsanych měření učinit zatím určité závěry o příspěvku záření gama, vysílaného Sluncem.

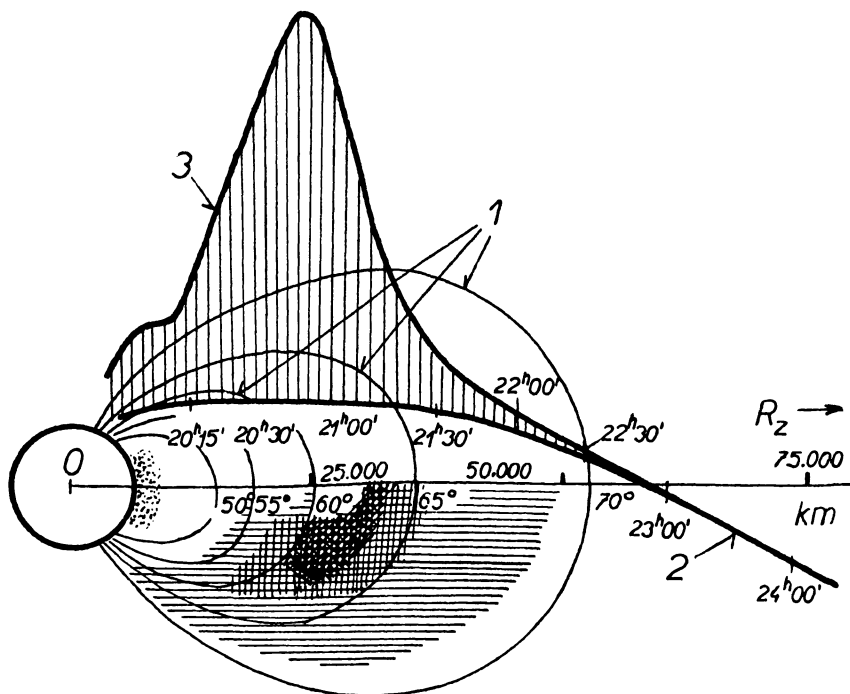
Poněvadž zůstala řada otázek nevyjasněných, bylo v sovětské kosmické raketě, vypuštěné 2. ledna 1959, instalováno několik přístrojů pro měření KZ a „zemského korpuskulárního záření“. Byly to především dva přístroje, z nichž jeden měl jako detektor Geigerův-Müllerův počítač o rozměrech 1 cm krát 5 cm, druhý Geigerův-Müllerův počítač o rozměrech 1,8 cm krát 10 cm. Stěny počítačů byly z nerezavějící oceli a měly tloušťku 0,1 mm. Kromě toho nesla sovětská kosmická raketa ještě dva přístroje se scintilačními počítači. Jeden z nich byl stejný, jako scintilační počítač umístěný v třetí sovětské umělé družici, který byl popsán výše. Detektorem byl opět krystal jodidu sodného NaI(Tl) o rozměrech 39 mm krát 40 mm. Byl schopen registrovat záření s třemi energetickými prahy: 45 keV, 450 keV, 4,5 MeV, a celkovou ionisaci, vyvolanou zářením v scintilátoru.

Oba Geigerovy-Müllerovy počítače a scintilační počítač byly v hliníkovém krytu, jehož stěny měly tloušťku 1 g/cm². Kromě toho asi 20% celého tělesového úhlu bylo zastíněno větším množstvím materiálu o tloušťce asi 10 g/cm².

Druhý scintilační počítač měl stěny o tloušťce 0,5 g/cm² a byl umístěn vně stínícího krytu. Vůči volnému prostoru byl krytý hliníkovou folií o tloušťce 7 μ , odpovídající hmotě 1,9 g/cm².

Všechny přístroje byly vybaveny pouze polovodičovými diodami a triodami, aby jejich příkon byl co nejmenší. Rozlišovací schopnost reduktorů impulsů byla 10^{-4} sek.

Tyto přístroje zaregistrovaly během letu sovětské kosmické rakety podél její dráhy mezi 8000 až 150000 km od středu Země intenzitu „zemského korpuskulárního záření“, které je možno nazvat také sekundární nebo terciární složkou KZ. Kromě toho umožnily odhadnout složení záření v obou pásmech (zónách) vysoké intenzity KZ a určit v hrubých rysech jeho spektrum. Na obraze 4 je

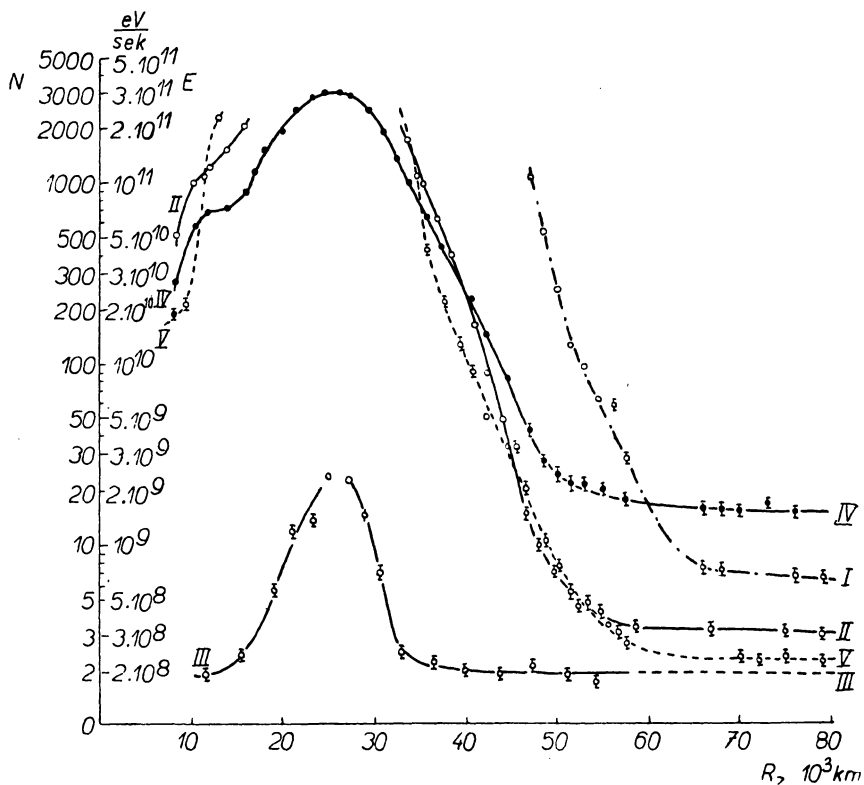


Obr. 4. Celková intenzita kosmického záření (křivka 3), zanesená vzhledem k dráze (křivka 2) sovětské kosmické rakety při průletu zemským geomagnetickým polem, charakterizovaným silo-křivkami 1. Podél dráhy kosmické rakety je zanesen moskevský čas. Vzdálenost R_z od středu Země v rovině geomagnetického rovníku je udána v kilometrech. Pro hodnoty celkové intenzity bylo použito měření, znázorněných v obraze 5 křivkou IV. Tečkami je znázorněno vnitřní pásmo, čárkami vnější pásmo. Hustota čárkování má vyznačit rozdělení intenzity záření ve vnějším pásmu.

zakreslena dráha druhé sovětské kosmické rakety vzhledem k zemskému magnetickému poli, v němž se pohyb částic KZ děje podél siločar tohoto pole. Proto jsou i výsledky měření intenzity KZ vztahovány ke geomagnetickým souřadnicím.

Z obraze 4 je vidět, že maximum intenzity „zemského korpuskulárního záření“ nastává ve vzdálenosti 26000 km od středu Země, zatím co ve vzdálenosti 55000 km od středu Země jeho intenzita je prakticky rovna nule, takže ve větších vzdálenostech existuje již jen primární složka KZ. Záleží pochopitelně nejen na vzdálenosti od středu Země, ale také na tom, na které siločáře zemské-

ho magnetického pole se měření koná. Tak např. intenzita záření v různých bodech siločáry 60°) pro výšky 400, 1800, 5600 a 14000 km nad povrchem zemským má po řadě hodnoty v poměru 1 : 20 : 200 : 700. Pro první dvě výšky byly hodnoty intenzity záření získány aparaturami třetí sovětské družice.



Obr. 5. Závislost intenzity kosmického záření na vzdálenosti R_z od středu Země, udané v tisících kilometrů. Křivky I, II, III udávají počet impulsů N , vyvolaných zářením s energií větší než 45 keV (křivka I), s energií větší než 450 keV (křivka II), s energií větší než 4,5 MeV (křivka III), a vztažený na jednotku plochy příčného řezu (19 cm^2) scintilačním krystalem. Křivka IV udává celkovou ionisaci, vyjádřenou celkovou energií v eV, vybařenou zářením v scintilačním krystalu za 1 sek. Křivka V udává počty impulsů N měřené Geigerovými - Müllerovými počítači a vztažené na jednotku plochy jejich příčného řezu, který byl pro jeden počítač 4 cm^2 , pro druhý počítač 15 cm^2 .

Jak bylo svrchu uvedeno, experimentální výsledky, získané aparaturami třetí sovětské družice, vedly k tomu, že je nutno „zemské korpuskulární záření“ rozdělit do dvou pásem, z nichž jedno bylo nazváno „polárním pásmem“, druhé „rovníkovým pásmem“. Z hlediska rozložení celého jevu v prostoru jeví se účelnějším nazvat tato pásma podle Vernova a jeho spolupracovníků „vnější pásmo“ (vnější zóna) a „vnitřní pásmo“ (vnitřní zóna).

³⁾ Siločára zemského magnetického pole je zde označována podle Vernova a spolupracovníků tou geomagnetickou šířkou, na které protíná povrch Země.

Hranice „rovníkového“ čili „vnitřního“ pásma leží ve výši 1000 km na šířce 45°, a je přirozené připustit, že na straně větších výšek je hranicí tohoto pásma silokřivka 45°. Z obrazu 4 je dále patrné, že dráha sovětské kosmické rakety nikde neprotíná vnitřní pásmo. V důsledku toho aparatury nezaznamenaly (jak vyplývá ještě ze spektrálního rozboru záření) nikde podél dráhy rakety částice s vysokou energií, které charakterizují vnitřní pásmo a které jsou pravděpodobně protony, vzniklé při rozpadu neutronů.

Měření spektrálního složení záření podél dráhy rakety však vesměs přinesla výsledky velmi přibližně shodné s výsledky pozorování, získanými v třetí sovětské družici při jejich letech nad polárními končinami. Již z tehdejších měření bylo možno ve výškách 400 až 1800 km nad zemí zjistit poměrně ostrou hranici „vnějšího“ čili „polárního“ pásma vysoké intenzity v blízkosti šířky 55°. Obraz 4 ukazuje, že při letu kosmické rakety ve výši asi 7000 km, kdy se její dráha blíží k siločáře 55°, nastává zřejmé zmenšování intenzity záření. To vede k závěru, že „vnější pásmo“ (vnější zóna) „zemského korpuskulárního záření“ se rozprostírá mezi siločarami 55° až 67°, přičemž maximum intenzity záření je v okolí linie 62°.

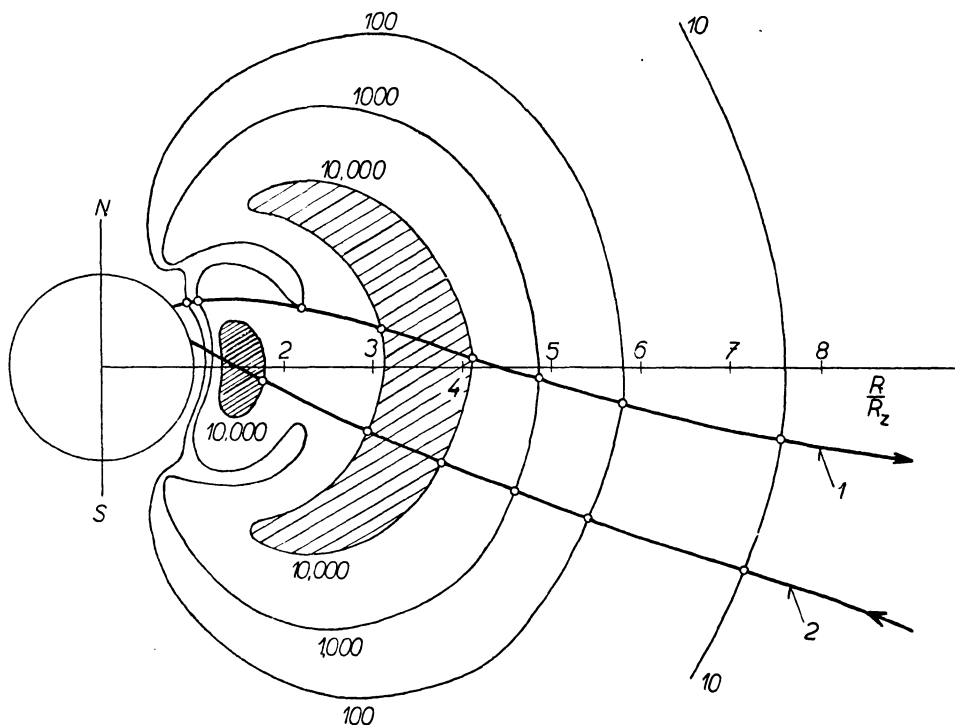
Na obraze 5 jsou zaneseny výsledky měření intenzity záření ve vnějším pásmu vysoké intenzity v závislosti na vzdálenosti od středu Země.

Výsledky měření ve výši 40000 až 50000 km aparaturou se stíněným scintilačním počítačem umožnily získat obraz o spektru záření ve vnějším pásmu. Poměr počtu částic ve výše zmíněných třech oborech (45 keV, 450 keV, 4,5 MeV) byl stanoven takto: $N(> 45 \text{ keV}) : N(> 450 \text{ keV}) : N(> 4,5 \text{ MeV}) = 1 : 10^{-2} : 10^{-5}$. Z toho vyplývá, že podstatná část záření připadá na záření Roentgenovo o energii 10 keV, případně menší. K zpřesnění spektra byly pak přibrány ještě výsledky měření, získané aparaturami s Geigerovými-Müllеровými počítači, které byly okalibrovány rentgenovým zářením v oblasti 20 až 100 keV. Ve výškách mezi 40000 až 50000 km byla odhadnuta tímto způsobem energie Roentgenova záření na 50 až 69 keV.

Pokud jde o spektrum neutronů, bylo z křivek na obraze 5 Vernovem a spolupracovníky odvozeno, že spektrum elektronů ve „vnějším pásmu“ je různé v různých vzdálenostech od středu Země, a že energie elektronů ve středu vnějšího pásma, kde jejich hustota je největší, má nejmenší hodnotu $\sim 25 \text{ keV}$. energii lze odhadnout v maximu intenzity ještě z výsledků měření druhého (nestíněného) scintilačního počítače, kterým byl naměřen tok energie $2 \cdot 10^{11} \text{ eV/cm}^2 \cdot \text{sek. sterrad}$. Poněvadž v prvním scintilačním počítači, stíněném vrstvou hliníku 1 g/cm^2 , byl určen za stejných podmínek tok energie $1,5 \cdot 10^9 \text{ eV/cm}^2 \cdot \text{sek. sterrad}$, bylo možno z obou uvedených hodnot při uvážení účinnosti obou scintilačních počítačů odhadnout pro energetické spektrum elektronů ve tvaru $N(> E) \sim E^{-\gamma}$ mocnitél $\gamma \sim 5$. V oblastech menší intenzity, tj. na obvodě pásma, je spektrum měkčí: $\gamma \sim 3$.

Tok energie, naměřený druhým (nestíněným) scintilačním počítačem v sovětské kosmické raketě, nesouhlasí úplně s měřeními, získanými Van Allenem a spolupracovníky ([13] až [19]) na čtvrtém satelitu, vypuštěném v USA. Tato měření vedla k hodnotě energetického toku záření $10^{15} \text{ eVcm}^{-2} \cdot \text{sek}^{-1} \cdot \text{sterrad}^{-1}$. Tento rozdíl nelze vysvětlit růzností stínění, které v přístroji Van Allena a spolupracovníků bylo 1 mg/cm^2 . Kdyby se nepřihlíželo k různosti času i místa, v nichž byla měření na obou raketách provedena, bylo by nutno dojít k závěru, že ve vnějším pásmu existují ještě pomalé protony s doletem od 1 do $1,9 \text{ mg/cm}^2$.

Obrovskou oblast záření s vysokou intenzitou objevila a měření této intenzity provedla skupina pracovníků ze státní univerzity v Iowě (USA), vedená prof. J. A. Van Allenem ([13] až [19]) na satelitech „Explorer I“ (satelit „1958x“⁴⁾), „Explorer III“ (satelit „1958γ“), „Pioneer III“ a „Explorer IV“ (satelit „1958ε“). Obraz 6 ukazuje podle Van Allena a spolupracovníků



Obr. 6. Rozložení intenzity kosmického záření ve vnitřním a vnějším pásmu. Čísla u jednotlivých křivek, znázorňujících plochy téže intenzity, udávají počet impulsů za 1 sek, vztažených na 1 cm příčného řezu počítače. Na povrchu zemském a za vnějším pásmem je tento počet roven zhruba 1 imp. za sek na 1 cm². Přímka NS je geomagnetická osa zemská. Na osu souřadnic je nanášena v rovině geomagnetického rovníku vzdálenost od středu Země, vyjádřená v poloměrech zemských R_z . Čáry 1 a 2 značí dráhy severoamerických raket.

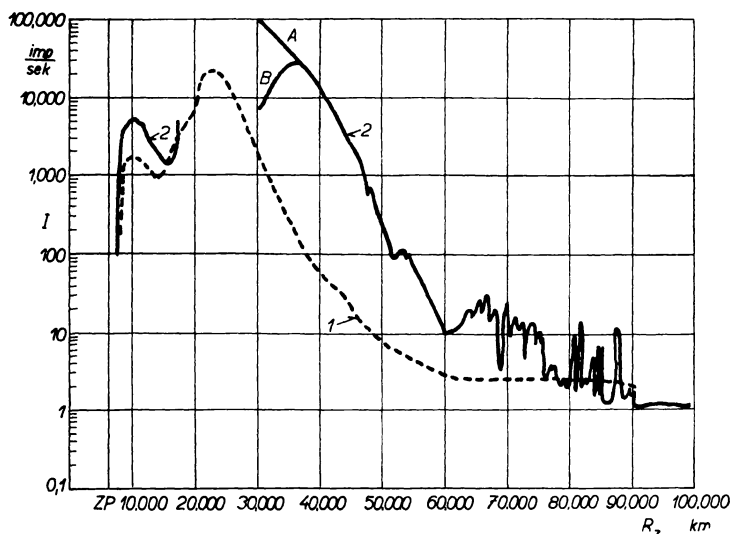
strukturu intenzity záření v obou popsaných pásmech, obklopujících Zemi, tak jak byla odvozena z pozorování, získaných aparaturou s Geigerovým-Müllеровým počítačem, umístěnou na družici „Explorer IV“ a na družici „Pioneer III“. Srovnáme-li obraz 4 s obrazem 6, je možno říci, že v podstatě není rozdíl mezi pozorováními prostorového rozložení obou pásem záření vysoké intenzity. Tato měření byla pak ještě doplněna výsledky, získanými měřeními z družice „Pioneer IV“ vypuštěné v USA dne 3. března 1959, která vcelku potvrzuje strukturu pozorovaných pásem (zón).

Obraz 7 ukazuje závislost intenzity záření ve vnitřním a vnějším pásmu v počtech impulsů za vteřinu tak, jak je zaregistrovaly počítačové přístroje,

⁴⁾ O této umělé družici viz v tomto časopise, III (1958), č. 4.

umístěné v družici „Pioneer III“ a „Pioneer IV“. Zajímavá jsou data, získaná ve dnech 3. až 6. března 1959 přístroji, umístěnými v družici „Pioneer IV“, která ukazují rozpínání vnějšího pásma k velkým výškám nad povrchem zemským (nad 60000 km), jakož i zvýšení intenzity záření v celém pásmu. Tyto zjevy jsou v zřejmé souvislosti s mimořádnými úkazy, jež proběhly krátce před tím, dne 25. února 1959, v oblasti M na Slunci.

Vnitřní pásmo je složeno — podle názorů Van Allena, založených na pozorování amerických družic i podle údajů ze sovětské družice a sovětské kosmické rakety — z protonů a elektronů. Protony představují jeho tvrdou složku s energií řádu 100 MeV, zatím co elektrony s energií až do 1 MeV tvoří jeho měkkou složku, která má energetické spektrum blížíící se rychle k nízkým energiím. Protony a elektrony ve vnitřním pásmu pocházejí s největší pravděpodobností z rozpadu neutronů, vzniklých při interakcích KZ s atmosférou Země a jejím povrchem. Možná, že se do ni mísí i částice (elektrony) z vnějšího pásma.



Obr. 7. Závislost celkové intenzity kosmického záření na vzdálenosti od středu Země. Intenzita I je vyjádřena v počtech impulsů za sekundu, naměřených Geigerovým - Müllerovým počítačem. Vzdálenost R_z od středu Země je udána v kilometrech. Bod ZP udává zemský povrch. Křivka 1 byla naměřena zařízením, umístěným v raketě „Pioneer III“, vypuštěné 6. prosince 1958, křivka 2 byla získána aparaturou v raketě „Pioneer IV“, vypuštěné 3. března 1959.

Vnější pásmo pozůstává výhradně z elektronů, jejichž energie nepřesahuje 100 keV. Tok elektronů s energií větší než 20 keV je podle posledních Van Allenových údajů řádu 10^{11} částic za vteřinu, letících jedním čtverečním centimetrem, což je hodnota, která je nyní v souladu s výsledky Vernova a jeho spolupracovníků. Podle Van Allena je vnější pásmo vysoké intenzity v úzkém vztahu ke geofyzikálním jevům, jako je polární záře, geomagnetické bouře atd., které je možno přisoudit přímému vlnění („vstříkování“) nabitých částic ze Slunce do vnějšího pásma, kde jsou „zachyceny“ geomagnetickým polem. Urychlení těchto částic je zatím otevřenou otázkou. Van Allen sám udává dvě možnosti takového urychlení. Řadu problémů, týkajících se vnějšího pásma, bude proto třeba ještě objasnit.

Není konečně pochyby o tom, že obdobná pásma vysoké intenzity záření existují kolem Měsíce a ostatních planet naší sluneční soustavy, např. kolem planety Marsu nebo Venuše. Pásma kolem Měsíce nebude mít pravděpodobně vysokou intenzitu, nebo nebude snad vůbec existovat vzhledem k předpokládanému malému magnetickému momentu Měsíce.

Závěrem je možno říci, že dnes je možno mít za prokázáno, že existují dvě pásma (zóny) záření vysoké intenzity, obepínající naši Zemi, nazvaná vnitřní a vnější pásmo. Obě pásma jsou vytvářena ve vzdálenosti asi od 1000 do 55000 km nad povrchem zemským geomagnetickým polem, které zachytí částice jako „v pasti“ tím, že je donutí, aby se pohybovaly po siločarách. Vnitřní pásmo je tvořeno jednak protony, jednak elektrony, přičemž složka protonová je tvrdší než složka elektronová. Částice (protony a elektrony) pocházejí pravděpodobně z rozpadu neutronů KZ. Vnější pásmo je tvořeno převážně elektrony, které by do něj mohly přilétávat buď z vnitřního pásma nebo ze Slunce, nebo z obou těchto zdrojů současně. Elektronová složka vyvolává v obou pásmech brzdné elektromagnetické záření Roentgenovo.

Literatura

- [1] S. N. Vernov, Ju. J. Logačev, A. E. Čudakov, Ju. G. Šafer, UFN, LXIII (1957), 149
- [2] S. N. Vernov, N. L. Grigorov, Ju. J. Logačev, A. E. Čudakov, Dokl. AN SSSR, 120. (1958), 1231.
- [3] S. N. Vernov, N. L. Grigorov, J. P. Ivaněnko, A. J. Lebedinskij, V. S. Myrzin, A. E. Čudakov, Dokl. AN SSSR, 124 (1959), 1022.
- [4] S. N. Vernov, A. E. Čudakov, *Tez. dokl. na assambleje MGG*, Moskva 1958.
- [5] A. E. Čudakov, tamtéž.
- [6] S. N. Vernov, N. L. Grigorov, Ju. J. Logačev, A. E. Čudakov, Dokl. AN SSSR, 120 (1958), 6.
- [7] S. N. Vernov, A. E. Čudakov, Dokl. na 2-j meždunar. konf. po primeněnju atomnoj energii v mirnyh celjach.
- [8] S. N. Vernov, A. E. Čudakov i dr., *Iskusstvennyje sputniki Zemli*, Izd. AN SSSR, Moskva 1959.
- [9] S. N. Vernov, A. E. Čudakov, E. V. Gorčakov, Ju. J. Logačev, P. V. Vakulov, *Planet. Space Science*, 1 (1959), 86.
- [10] S. N. Vernov, A. E. Čudakov, P. V. Vakulov, Ju. J. Logačev, Dokl. AN SSSR.
- [11] A. N. Čarachějan, *ŽETF*, 35 (1958), 5.
- [12] S. N. Vernov a spoluprac., *These přednášek Konference o kosmickém záření*, Moskva, červenec 1959 (viz též sborník této konference, který je v tisku).
- [13] J. A. Van Allen, G. H. Ludwig, E. C. Ray and C. E. Mc Ihwain, *Jet Propulsion*, 28 (1958), 588.
- [14] J. A. Van Allen, C. E. Mc Ihwain and G. H. Ludwig, *J. Geophys. Res.*, 64 (1959), 271.
- [15] J. A. Van Allen and L. A. Frank, *Nature*, 183 (1959), 430.
- [16] J. A. Van Allen, C. E. Mc Ihwain and G. H. Ludwig, *Přednáška na symposiu „Symposium on Scientific Effects of Artificially Introduced Radiations at High Altitude“*; vyjde v *J. Geophys. Res.* a v *Proc. of the (U. S.) National Academy of Sciences*.
- [17] L. Allen Jr., tamtéž.
- [18] J. A. Van Allen and L. A. Frank, *Nature*, v tisku.
- [19] J. A. Van Allen a spoluprac., *Přednáška Konference o kosmickém záření*, Moskva, červenec 1959. Viz též sborník této konference, který je v tisku.
- [20] J. Pernegr, V. Petržílka, L. Tomášková, *Kosmické záření*, Nakl. ČSAV, Praha.