

PRIESTOROVÉ ROZDELENIE NABÍTYCH ČASŤÍ V SPRŠKACH KOZMICKÉHO ŽIARENIA

TEO HLAVÁČ*, Bratislava

Opisujeme zložky komplexnej aparatury, pomocou ktorej sme urobili merania priestorového rozdelenia nabitých častíc v sprškách kozmického žiarenia, účel jednotlivých zložiek, spôsob registrácie a vyhodnocovania pomocou počítača. Osobitnú pozornosť venujeme problému takzvaných mladých spršiek. Zisťujeme podiel viacsovoých spršiek na celkovom počte zaregistrovaných a porovnávame výsledky s meraniami iných autorov.

I. ÚVOD

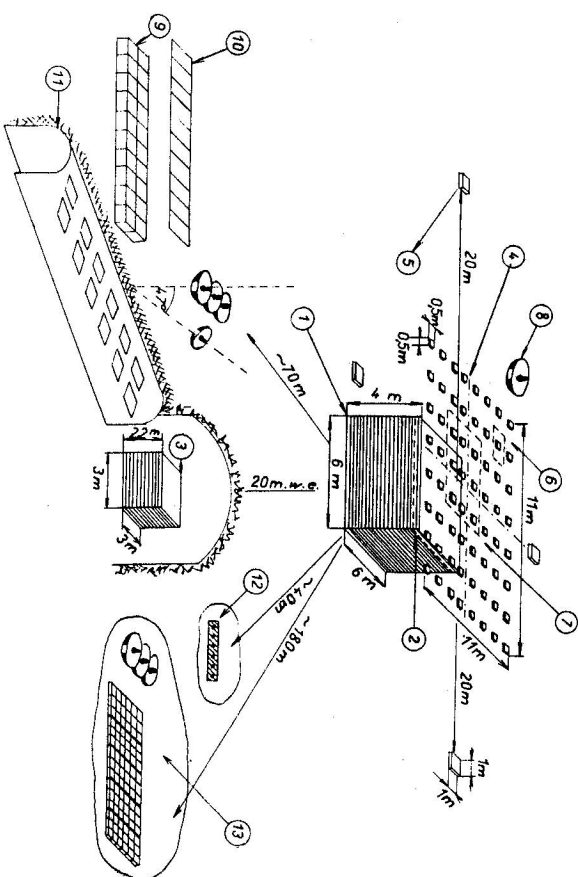
Štúdiu priestorového rozdelenia nabitých častíc v širokých atmosférických sprškách kozmického žiarenia (ďalej EAS = Extensive Air Shower) venujú dodnes pozornosť mnohí autori v teórii, ako aj v experimente. Dôvodom tohto neprestávajúceho záujmu je skutočnosť, že z údajov o priestorovom rozdelení v EAS možno bezprostredne určiť celkový počet častíc v sprške, a tým aj odhadnúť energiu primárnej častice, ktorá spôsobila spršku. Experimenty sú cenne najmä tým, že poskytujú údaje o počte častíc na rôznych úrovniach pozorovania, čím potvrdzujú alebo odvrhujú jednotlivé teórie a modely interakcií primárnych aj sekundárnych častíc. My sme urobili merania pomocou komplexnej aparatury pre meranie EAS na stanici kozmického žiarenia na Tan-Sane (3340 m n. m.). Stanica patrí Akadémii vied ZSSR. Autor sa zúčastnil r. 1966—1968 budovania aparatury a r. 1968 aj meraní, najmä so S. I. Nikolským a jeho spolupracovníkmi [10], [20].

II. OPIS KOMPLEXNEJ APARATURY

Názornú schému komplexnej aparatury predstavuje obr. 1. Podrobnejší opis centrálnej časti, takzvanej „šachovnice scintilátorov“ a dvoch hodoskopov

umiestnených medzi scintilačnými detektormi sme uviedli v článku o spektre EAS [1].

Vymenujme aspoň jednotlivé časti aparatury (číslovanie je totožné s číslami na obr. 1):



Obr. 1. Národná schéma komplexnej aparatury. 1 — veľký ionizačný kalorimeter, 2 — vrstva fotografických emulzií, 3 — malý ionizačný kalorimeter, 4 — šachovnica a riadiace scintilátory, 5 — scintilátory vo vzd. 20 m a chronotón, 6 — malý hodoskop, 7 — veľký hodoskop, 8 — čerenkovské detektory, 9 — scintilátory (20 m²) vo vzd. 70 m, 10 — hodoskop (144 GM-počítacov) vo vzd. 70 m, 11 — mezonový hodoskop v tuneli, 12 — scintilátory a čerenkovské počítacie vo vzd. 180 m.

1. Veľký ionizačný kalorimeter: pozostáva zo 14 radov ionizačných komôr, pričom vždy nasledujúci rad komôr je kolmý na predchádzajúci. Medzi radmi je 5 cm vrstva olova. V každom rade je 96 ionizačných komôr s rozmermi 5,5 cm × 10 cm × 300 cm. Steny komôr sú z medeného plechu hrubého 2,5 mm. Komory sú naplnené argónom s prímесou 5 % dusíka. Aktívna plocha kalorimetra je 36 m².

2. Vrstva fotografických emulzií: nachádza sa pod vrchným radom ionizačných komôr. Služí na presnejšiu lokalizáciu častíc, pretože maximálnu rozlišujúcu schopnosť ionizačného kalorimetra určuje šírka komôr, čiže maximálne 10 cm. Rozlišujúca schopnosť emulzií je 50 mikrónov.

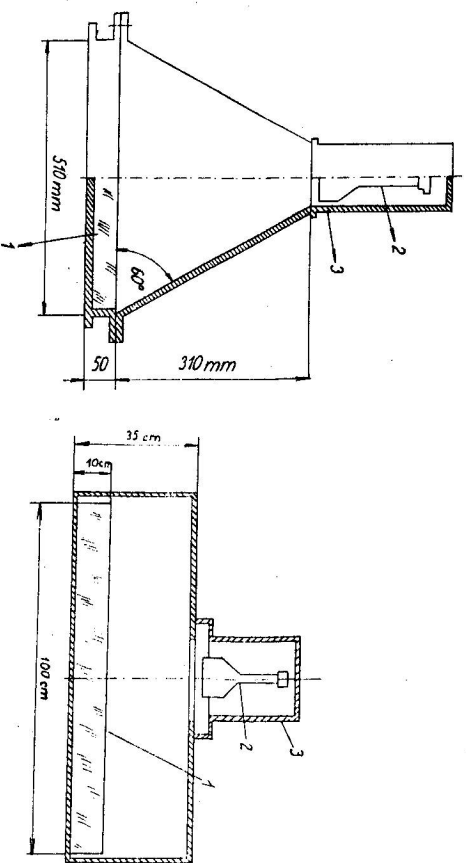
3. Malý ionizačný kalorimeter: nachádza sa presne pod veľkým kalori-

* Výskumné výpočtové stredisko OSN, BRATISLAVA, Dúbravská cesta.

metrom, od ktorého je oddelený 11 m hrubou vrstvou pôdy, t. j. asi 20 m vodného ekvivalentu. Pozostáva z 15 vrstiev ionizačných komôr toho istého typu aj rozmerov ako veľký ionizačný kalorimeter, ale jeho účinná plocha je iba jedna štvrtina z plochy veľkého kalorimetra, 9 m². Malý kalorimeter umožňuje podrobné štúdium μ -mezónovej zložky EAS.

4. Šachovnica scintilačných a riadiacich scintilátorov. Nad veľkým ionizačným kalorimetrom, pod ľahkou eternitovou stiechou, visí 64 scintilačných počítáčov, usporiadaných po 8 do 8 radov. Rozmery scintilátorov sú 50 cm × 50 cm × 5 cm; nad každým scintilátorom je upevnený fotonásobič FEU-24. Geometrické usporiadanie vidieť z obr. 2.

Centrálne riadiace scintilačné detektory: majú rozmery 100 cm × 100 cm × 10 cm, slúžia na výber EAS podľa vopred zadaného kritéria pomeroz hustôt (obr. 3).



Obr. 2. Geometria scintilačných detektorov „šachovnice“. 1 — scintilátor, 2 — foto-

Obr. 3. Geometria riadiacich scintilačných detektorov v centre a vo vzd. 20 m. 1 — scintilátor, 2 — fotonásobič FEU-45, 3 — kryt.

5. Scintilátory vo vzd. 20 m: ich geometria v kombinácii s fotonásobičom FEU-45 sa stotožňuje s centrálnymi scintilátormi. Jedno z možných kritérií výberu spŕšky (spustenia registračnej aparatury) je takzvaný „spŕškový master“, ktorý spúšťa registračnú len v prípade centrálnej spŕšky, určenej kritériom:

$$1,5q_{cent} \geq \sum q_{perif},$$

kde q_{cent} — hustota častíc v centrálnom scintilátore, $\sum q_{perif}$ — súčet hustôt v 4 periférnych scintilátoroch vo vzd. 20 m.

Okrem fotonásobiča FEU-45, ktorý je nad centrom scintilátora, sú nad všetkými štyrmi periférnymi scintilátormi po 4 fotonásobiče FEU-36 s nosenkovou časťou chronotrónu. Týchto 16 fotonásobičov tvorí základnú časť chronotrónu. Z presného namerania oneskorenia, s akým dosiahne čelná stena spŕšky protipoložené, 40 m od seba vzdialené, scintilačné detektory, vypočítame sklon osi jednotlivých EAS.

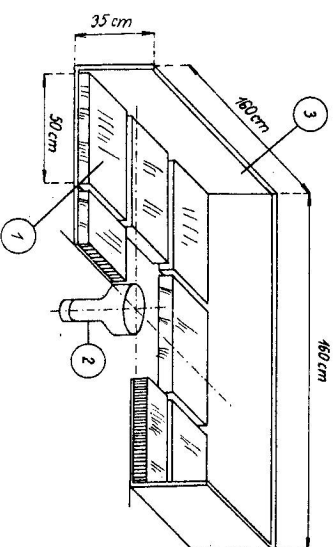
6. Malý hodoskop: pozostáva z 96 GM-počítáčov, rozložených v jednom rohu šachovnice, zapojených do spoločnej registračnej sústavy GK-7.

7. Veľký hodoskop: 144 GM-počítáčov typu SI-5G, rozložených v centre šachovnice.

Oba hodoskopy slúžia najmä na kalibráciu scintilačných počítáčov, medzi ktorými sú umiestnené.

8. Čerenkovské detektory: vďaka priezračnosti atmosféry pre viditeľné svetlo, intenzita čerenkovského žiarenia charakterizuje stupeň rozvoja spŕšky do miesta pozorovania a tak aj prvotnú energiu E_0 častice, ktorá spôsobila spŕšku. Uhol 47° pri niektorých detektoroch sme zvolili preto, že spŕška, ktorá príde na úroveň Tan-Šanskej stanice pod tým uhlom, prejde v atmosfére takým množstvom hmoty ako kolmá spŕška po úrovni mora.

9. Scintilátory vo vzd. 70 m. Inú geometriu než centrálna majú scintilačné detektory vo vzd. 70 m (obr. 4). Detektorov je 10, každý pozostáva z 8 scintilátorov o rozmeroch 50 cm × 50 cm × 5 cm, uložených na dne puzdra s rozmermi 160 cm × 160 cm × 35 cm. Puzdro je vnútri natreté bielou farbou s koeficientom odrazu 0,9. V centre puzdra je umiestnený fotonásobič FEU-45 tak, že jeho fotokatóda „hľadá“ nahor, aby na ňu nedopadali priamo lúče od scintilátorov.



Obr. 4. Geometria scintilačných detektorov vo vzd. 70 m. 1 — 8 scintilátorov, 2 — fotonásobič FEU-45, 3 — kovový kryt scintilátorov a fotonásobiča.

látorov, ale len rovnomerne rozptýlené svetlo od stien puzdra. Takýmto usporiadaním závisí amplitúda signálu na výstupe fotónásobiča len nepatrne od miesta, ktorým na scintilátore prešla časťica. Vzdialenosť 70 m od centra aparátúry voľne preto, že pri centrálnych spŕškach v tejto vzdialenosti prakticky závisí hustota časťíc len od ich celkového počtu v EAS a nie od veľičiny S , veku spŕšky. Táto okolnosť nám umožňuje veľmi jednoduchú a dostatočne spoľahlivo určiť celkový počet časťíc N v spŕškach s $N > 10^5$ na úrovni pozorovania.

10. Hodoskop vo vzd. 70 m: slúži podobne ako centrálna hodoskopy najmä na kalibráciu scintilátorov.

11. Mezónový hodoskop v tuneli: v svahu, na ktorom je vysokohorské sedlo so stanicou, je otvor, ktorým vyúsťuje vodorovný tunel, spájajúci podzemný priestor malého kalorimetra s povrchom. V tuneli je rozložený mezónový hodoskop s 1000 GM-počítacími, ktorý slúži na štúdium priestorového rozloženia μ -mezónov v EAS.

12. Neutrónový monitor: približne vo vzd. 40 m od centra je umiestnený neutrónový supermonitor s celkovou efektívnou plochou 18 m². Pozostáva z 18 počítáčov, uložených v polyetylénových blokoch, odtienených prstencovitým obalom Pb. Účelom je komplexné zachytenie aj jadro-aktívnych časťíc malej energie v EAS.

13. Zložka aparátúry vo vzd. 180 m od centra: obsahuje scintilačné a čerenkovské detektory. Služi najmä na štúdium priestorového rozdelenia časťíc a na určenie celkového počtu časťíc v spŕškach rôznej intenzity. Podotýkame, že merania, ktorých výsledky v referáte podávame, sú urobené bez zložky aparátúry vo vzd. 180 m.

III. SPÔSOB REGISTRÁCIE

Na spustenia aparátúry na registráciu sme použili niekoľko druhov master-pulzov, a to podľa dvoch principiálne odlišných kritérií. Prvým kritériom bolo prekročenie počtu časťíc v určitej skupine detektorov, druhé kritérium pozostávalo vo výbere centrálnych spŕšok, ktoré totiž spŕnali vopred určený gradient úbytku od centra aparátúry. Pri meraniach priestorového rozdelenia časťíc v EAS sme získavali údaje najmä pomocou posledného druhu masterpulzov. Údaje o jednotlivých spŕškach sa zo všetkých častí aparátúry postupne zaznačili na magnetickú pásku tak, že každému detektoru zodpovedá určité miesto na magnetickú pásku. Veľkosti pulzov od fotónásobičov a od ionizačných komôr oboch kalorimetrov, transformované na číslo, zapísali sa v binárnom kóde tak, že ich spracovanie na malom samočinnom počítači „NAIRI“ bolo veľmi pohodlné. Výstup počítača sme si naprogramovali tak, že sme dostali

hustoty v mieste každého detektora v geometrii, čím bližšej ku skutočnému priestorovému rozloženiu detektorov. Každú spŕšku sme zaznačili graficky a taktiež sme hodnoty jednotlivých detektorov, rovnako vzdialených od osi EAS, zaznačili do tabulky. Pritom sme rozdeľovali spŕšky podľa výšky ich vzniku, ako aj stupňa rozvoja S , ktorý sme určovali podľa gradientu úbytku hustoty časťíc v jednotlivých spŕškach. Na tento účel sme si prepočítali funkciu priestorového rozdelenia, ako ju uvádzajú Nishimura a Kamata [2] pre vzdialenosti 6 m a 20 m od centra aparátúry. Dostali sme pomery uvedené v tab. 1.

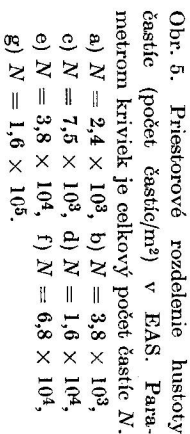
Tabuľka 1

S	$\frac{6\text{m}}{20\text{m}}$
0,6	6,9
0,8	6,0
1,0	4,8
1,2	4,0
1,4	3,3
1,6	2,7

Každú spŕšku sme porovnali s tab. 1, čím sme dostali skupiny rovnako starych spŕšok. Konečné triedenie do skupín, zodpovedajúcich jednotlivým krivkám na výslednom grafe, sme robili podľa mŕhutnosti spŕšky.

IV. VÝSLEDKY MERANÍ

Celkove sme zaregistrovali vyše 10 000 spŕšok. Na základe nameraných hodnôt môžeme podať dostatočne detailný priebeh priestorového rozdelenia nabitých časťíc, najmä v intervale $2 \times 10^3 < N < 2 \times 10^5$, aj keď značný počet nameraných EAS bol mimo tohto intervalu. Úhrnné výsledky z intervalu $2 \times 10^3 < N < 2 \times 10^5$ sú vyjadrené na obr. 5. Priestorové rozdelenie na obr. 5 zodpovedá strednej hodnote rozvoja spŕšok $S = 1, 2$, čo je v zhode s teoretickými výsledkami pre nadmorskú výšku Ťan-Šanskej stanice [2, 3]. Podobné experimentálne hodnoty priestorového rozdelenia dostali mnohí autori. Spomeňme aspoň niektoré merania urobené taktiež na úrovni hôr, napr. Cocconi, 3260 m [4], Zacepin, 3860 m [5], Kasnitz, 3260 m [6], Williams, 3050 m [7], Hazen, 3260 m [8] a mnoho ďalších. Časť uvedených meraní bola urobená pomocou GM-počítáčov, časť ionizačnými komorami, komplexnosťou sa však žiadna z nich nedá porovnávať s Ťan-Šanskou aparátúrou.



Uviedli sme, že teoretické výpočty i väčšina experimentálnych výsledkov potvrdzujú pre nadmorskú výšku Tan-Šanu strednú hodnotu $S = 1,2$. Na základe prepočtov, ktoré sme urobili podľa Nashimuru pre jednotlivé porovnávacie body našej aparatúry, mali by byť hodnoty pomerov hustôt častíc v rôznych vzdialenostiach od centra EAS pri centrálnych spíškach:

kde $\bar{g}_s$ — stredná hustota častíc v „šachovnici“ scintilátorov, ϱ_{20} — stredná hustota častíc vo vzd. 20 m od centra, ϱ_{70} — stredná hustota častíc vo vzd. 70 m od centra.

Keď je pomer hustôt, čiže gradient úbytku, podstatne vyšší, to znamená, že spfška nevznikla v blízkosti hranice atmosféry, ale bližšie k aparatúre. Také spfšky voláme „mladými“. Pri našich meraniach sme zaregistrovali jeden „mladý“ spfšok, pričom niektoré mimoriadnej mohutnosti. Aby sme názorne videli registráciu priestorového rozdelenia a zároveň tlaku tučnin v priestorovom rozdelení, uvedme aspoň časť záznamu o jednej „mladej“ spfške, ako sme ju dostali z počtáča (tab. 2).

[illegible]

Miesta označené V znamenajú nespohľadlivý, a preto automaticky vylúčený údaj detektora. Za týmito údajmi nasledovali priemery hodnôt scintilátorov „šachovnice“, ďalej 16 centrálnych scintilátorov v strede „šachovnice“, potom údaje všetkých ionizačných komôr veľkého a malého kalorimetra a ostatných častí aparatury. Pre štúdium priestorového rozdelenia častí je najzaujímavejšia časť záznamu, ktorú sme uviedli. Všetky hodnoty záznamu udávajú hustotu v dotýčanom detektore už prepočítanú na 1 m^2 . Vpravo od horizontálnych radov sú priemery za jednotlivé rady, pod vertikálnymi radmi sú uvedené priemery pre dotýčaný rad. Hodnoty 365, 365, 201, 164 patria scintilátorom vo vzd. 20 m v tom usporiadaní, ako sú na zázname. Obe hodnoty 21.9696 patria centrálnym riadiacim scintilátorom. Ďalej zo záznamu vidieť, že nasledujú hustoty scintilátorov vo vzd. 70 m, ďalej veľkého hodokopa, malého hodokopa a hodokopa vo vzd. 70 m.

Uvedený prípad spíškry je príklad nezvykle „mladej“ spíškry, ktorej gradient priestorového úbytku hustoty je rádove strnší než pri teoretickom $S = 1,2$, ktorého hodnoty sme uviedli na začiatku tohto odstavca.

$$\bar{\varrho}_8 : \varrho_{20} = 52; \quad \bar{\varrho}_8 : \varrho_{70} = 3140; \quad \varrho_{20} : \varrho_{70} = 60.$$

Uvedené hodnoty, ako aj paralelne výsledky z merania veľkým ionizačným kalorimetrom a fotografickými emulziami dokazujú, že uvedená spšška je jednou z tých zriedkavých, ktoré vzniknú len niekoľko km nad aparaturou oneskorenou interakciou prvotného protóna vysokej energie, ako sa o nich zmieňuje aj Nikolskij [9] a náš referát v Tasikente [10]. Z vyhodnotených spššok mali ešte dve podobný priebeh priestorového rozdelenia i mohutnosti.

2. Viacosové spršky

Vzhľadom na existenciu, vznik a počet viacsových spršiek sa mienky rôznych autorov rozchádzajú. Do päťdesiatych rokov sa vyskytujú experimentálne údaje, ktoré o viacsových sprškách svedčia veľmi zriedkavo a nie dosť presvedčivo. Možno to vysvetliť najmä nedostatčnosťou použitej aparatúry. Aj keď Davis (1951) [11], Hasen (1953) [12] a Heinemann (1954) [13] uverejnili svoje výsledky, svedčiace o niekoľkých osiach v jednotlivých sprškách, bola tendencia vysvetliť ich fluktuáciami v Poissonovom rozdelení [14]. Zdokonaľovaním aparatúr sa merania stávajú presvedčivejšie, aj keď nie jednoznačné. Merania pomocou hodoskopov z GM-počítáčov a merania iskrovými komorami dávajú výsledky nižšie než merania pomocou ionizačných komôr a scintilátorov. Napr. kým Tanaka nameral približne 2 % viacsových spršiek s celkovým počtom častíc $N > 10^5$ [15], Dovženko pomocou ionizačných komôr na Pamire už pre $N \leq 10^5$ nameral okolo 20 % mnohosových [16], Gorjunov pre $N > 10^5$ skoro 30 % viacsových [17], Bray referuje na konferencii v Jaipure dokonca o 50 % viacsových EAS pri $N > 10^5$ [18]. Merania McCusker svedčia o tom, že podiel viacsových EAS prudko stúpa so vzrastom spršky a je pre interval $10^5 < N < 10^6$ asi 300%, kým pre $N > 10^6$ uvádzajú až 90 % viacsových [17]. Podľa McCusker jedonosové spršky pochádzajú od jedného primárneho protóna, dvojnosové od primárnych deutériónov, viacnosové od jadier prvkov od hélia až po jadro železa.

Naše merania dávajú výsledky podstatne nižšie než posledne uvedených autorov. Ako sme už referovali [20], z prvých vyhodnotených EAS bolo viacsových asi 17 %, po vylúčení spočných prípadov, ktoré mohli byť výsledkom aparátneho charakteru, zostalo asi 14 % viacsových spršiek. Ďalšie vyhodnotenia nepriinesli podstatnú zmenu v podiele viacsových spršiek, iba zväčšili štatistiku, najmä v intervale s $N > 10^5$.

Ako kritérium viacsovej spršky sme volili:

$$\varrho_n \geq \frac{1}{2} \varrho_1 \text{ a zároveň } \varrho_{min} \leq \frac{\varrho_1 + \varrho_n}{4},$$

kde ϱ_1 — hustota v detektore, cez ktorý prechádza hlavná os, ϱ_n — hustota v detektoroch s ďalšími osami, ϱ_{min} — minimálna hustota medzi dvoma osami. Z 1044 EAS bolo 86 s $N > 10^5$ a 958 s $N < 10^5$.

V intervale $N > 10^5$ sme pritom identifikovali len 9 EAS viacsových, čo je približne 10 % a v intervale $N < 10^5$ spĺňalo jednoznačne kritérium pre viacsoj osí [20] len 88 spršiek, čo je 9 % z celkového počtu v tomto intervale. Sme si vedomí, že pri sprškách s veľkými fluktuáciami v priestorovom rozdelení je problematické aplikovať nejaké kritérium pre identifikáciu viacsovej

spršky, najmä keď nie je všeobecne prijatá matematicky presná formulácia takéhoto kritéria. Účitou svojvoľnou v aplikácii rôznych kritérií možno vysvetliť rôznosť výsledkov spomínaných autorov.

V. ZÁVER

Uviedli sme výsledky meraní priestorového rozdelenia hustoty nabitých častíc v sprškách kozmického žiarenia, zaregistrovaných komplexnou aparatúrou na úrovni hôr. Namerané hodnoty sú potvrdením a zároveň znamenajú spravenie experimentálnych údajov iných autorov, najmä v intervale $2 \times 10^3 < N < 2 \times 10^5$.

Hoci pre priemerné rozvinutie spršiek sme namerali hodnotu $S = 1,2$, ktorá zodpovedá teoretickej hodnote pre výšku Tan-šanskej stanice, zaregistrovali sme niekoľko veľmi „mladých“ spršiek. Uviedli sme konkrétne záznamy jednej typickej „mladej“ spršky, sprostredkovaný už pomocou počítača.

Vyhodnotené spršky sme skúmali aj z hľadiska problému viacsových spršiek. Naše merania svedčia o tom, že výskyt viacsových spršiek neprevyšuje 10 %

LITERATÚRA

- [1] Hlaváč T., Fyz. čas. SAV 20 (1970), 61.
- [2] Вегений С. З., *Лавинные процессы в космических лучах*. Гостехиздат, Москва 1948.
- [3] Kamata K., Nishimura J., J. Progress Theor. Phys., Suppl. 6 (1958), 93.
- [4] Cosson G., Tongiorgi V., Greisen K., Phys. Rev. 76 (1949), 1029.
- [5] Зацепин Г. и др., Изв. Ак. Наук СССР, серия физ., 17 (1953), 39.
- [6] Kasnitz H., Slette K., Phys. Rev. 94 (1954), 977.
- [7] Williams R. W., Phys. Rev. 74 (1948), 1689.
- [8] Hasen W. E., Williams R. W., Randall C. A., Phys. Rev. 93 (1954), 578.
- [9] Никольский С. И., Изв. Ак. Наук СССР, Серия физ., 33 (1969), 1506.
- [10] Глазач Т., Нам Р., Никольский С. И., Чердынцева К. В., Труды Всесоюзной конференции по космическим лучам, Ташкент 1968.
- [11] Davis L., Greenstein J. L., Astrophys. Journal 114 (1951), 206.
- [12] Hasen W. E., Heinemann R. E., Phys. Rev. 90 (1953), 496.
- [13] Heinemann R. E., Phys. Rev. 96 (1954), 161.
- [14] Greisen K., *Extensive Air Showers*, in: *Progress in Cosmic Ray Physics*, Vol. 3. Edited by J. G. Wilson, Amsterdam 1956.
- [15] Tanaka Y., Phys. Soc. Japan 16 (1961), 3.
- [16] Довженко О. И., Дисертация. Моск. Гос. Университет 1961.
- [17] Горюнов Н. Н., Дисертация. Моск. Гос. Университет 1962.
- [18] Bray A. D., et al. Proc. Conf. Cosm. Ray, Jaipur, 4 (1963), 35.
- [19] McCusker, Winn M. M., Wand R. H., et al., *The Strongly Interacting Particles*

in Air Shower Cores. Preprint, University of Sydney, 1962.
[20] Аминева Т. И., Асеекин В. С., Глават Т. и др., Изв. Акад. Наук СССР, серия физ., 33 (1969), 1514.
Došlo 11. 8. 1970

SPACE DISTRIBUTION OF CHARGED PARTICLES IN COSMIC RAY EXTENSIVE AIR SHOWERS

Teo Hlaváč

Summary

We have presented results of measuring of space distribution of charged Particles in Cosmic Ray Extensive Air Showers, as registered by a complex equipment at mountain level. Values that have been arrived at conform with and give more precision to experimental data by other authors, particularly in the range of $2 \times 10^3 < N < 2 \times 10^5$. Although for the average age of showers the value $S = 1,2$ has been measured, which corresponds to the theoretical value for the altitude of the Tien-Shan Station, several very „young“ showers have been registered. We have presented a concrete record of a typically young shower, achieved by means of a computer.

The evaluated showers have been studied also from the standpoint of the problem of multiaxial showers. Our measurements prove that the occurrence of multiaxial showers does not exceed 10 %.