

Vedecká rada Prírodovedeckej fakulty
Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Mgr. Janka Vrláková

Autoreferát dizertačnej práce

**NEŠTATISTICKÉ FLUKTUÁCIE V ZRÁŽKACH
RELATIVISTICKÝCH JADIER**

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti *philosophiae doctor*
v odbore doktorandského štúdia:
11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika

Košice 2004

Dizertačná práca bola vypracovaná bez absolvovania doktorandského štúdia na Katedre jadrovej a subjadrovej fyziky Ústavu fyzikálnych vied Prírodovedeckej fakulty Univerzity P. J. Šafárika v Košiciach.

Predkladateľ: Mgr. Janka Vrláková
Katedra jadrovej a subjadrovej fyziky
Ústav fyzikálnych vied
Prírodovedecká fakulta UPJŠ v Košiciach
Jesenná 5, 040 01 Košice

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.
na Ústave fyzikálnych vied Prírodovedeckej fakulty UPJŠ v Košiciach,
Jesenná 5, 040 01 Košice, v miestnosti č.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v doktorandského štúdia
vymenovanou dňa
predsedom spoločnej odborovej komisie
vo vednom odbore 11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika

Predseda spoločnej odborovej komisie:

Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
FMFI Univerzita Komenského
842 48 Bratislava

Obsah

Úvod	1
Ciele práce	2
1 Metóda analýzy	2
2 Emulzný detektor	3
3 Výsledky analýzy	5
3.1 Interakcie jadier ^{28}Si s jadrami emulzie	5
3.2 Interakcie jadier ^{197}Au s jadrami emulzie	8
3.3 Interakcie jadier ^{16}O s jadrami emulzie	9
3.4 Interakcie jadier ^{208}Pb s jadrami emulzie	11
3.5 Interakcie rôznych primárnych jadier s rovnakou hybnosťou	13
4 Záver	14
5 Summary	15
Zoznam prác	16
Zoznam použitej literatúry	18

Úvod

Práca je venovaná štúdiu neštatistických fluktuácií relativistických častíc produkovaných v zrážkach jadier v emulznom detektore. Prečo práve neštatistické fluktuácie? Tento fenomén sa objavil v časticovej fyzike už v sedemdesiatych rokoch minulého storočia, kedy boli publikované pozoruhodné prípady (eventy) so značnými fluktuáciami v rapidite, t.j. s veľkou koncentráciou sekundárnych častíc v malom intervale rapidity. Ako jeden z najznámejších možno spomenúť prípad kolaborácie JACEE, získaný pri štúdiu kozmického žiarenia [1]. Postupne sa objavili mnohé práce zaoberajúce sa touto tematikou, spočiatku to boli len pozorované prípady vyznačujúce sa vysokou hustotou častíc v malej oblasti fázového priestoru - v malom intervale rapidity, resp. pseudorapidity, neskôr to boli práce, ktorých autori sa snažili tento jav vysvetliť či navrhnúť metódu skúmania [2] - [6].

Kvantová chromodynamika predpovedá existenciu novej formy hmoty - tzv. kvarkovo-gluónovej plazmy pri extrémne vysokých jadrových hustotách a teplotách. Vysoké fluktuácie sú očakávané pri prechode zo stavu kvarkovo-gluónovej plazmy do hadrónovej fázy. Štúdium mnohočasticovej produkcie kumuluje veľa užitočných informácií a výsledkov. Na základe výpočtov kvantovej chromodynamiky sa tiež očakáva, že mnoho tzv. mini-jetov by mohlo byť sformovaných ako výsledok partónovo-partónových zrážok alebo gluónových strún, čo sa môže prejaviť ako fluktuácia v rapiditnom spektre [7]. Dôležitou črtou centrálnych relativistických zrážok ťažkých iónov je prítomnosť signifikantných fluktuácií v rapiditnej hustote [8].

V práci sú analyzované experimentálne údaje, ktoré boli získané jednotnou metódou v zrážkach relativistických jadier v emulznom detektore so zameraním na štúdium fluktuácií produkovaných sekundárnymi relativistickými časticami. Doposiaľ nebola vykonaná komplexná analýza experimentálnych údajov na rôznych primárnych jadrách a v širokom intervale energií pomocou faktoriálnych momentov. Experimentálne údaje pokrývajú široký interval hmotností primárnych jadier - ^{16}O , ^{22}Ne , ^{28}Si , ^{32}S , ^{197}Au a ^{208}Pb s hybnosťami tiež v pomerne značnom intervale od 4,1 do 200 A GeV/c. Ako metóda analýzy bola použitá metóda škálovacích faktoriálnych momentov, konkrétne metóda horizontálnych, vertikálnych a zmiešaných faktoriálnych momentov [9].

Zúčastnila som sa na všetkých etapách spracovania údajov z fotojadrových emulzií, počnúc od spracovania údajov získaných pri prehliadaní emulzného detektora až po fyzikálnu interpretáciu výsledkov, a to nasledovne:

- programové zabezpečenie spracovania a vyhodnocovania údajov získaných pri prehliadaní a meraniach prípadov z fotojadrových emulzií, formovanie DST (experimenty skúmajúce zrážky $^{32}S + Em$ s hybnosťou 4,5 A GeV/c, $^{197}Au + Em$ s hybnosťou 11,6 A GeV/c a $^{208}Pb + Em$ s hybnosťou 158 A GeV/c);
- spoluúčasť na fyzikálnej analýze údajov publikovanej v prácach č.1.-3. uvedených v Zozname prác;

- samostatná analýza experimentálnych údajov zo zameraním na štúdium neštatistických fluktuácií relativistických častíc produkovaných v zrážkach jadier metódou horizontálnych, vertikálnych a zmiešaných faktoriálnych momentov. Výsledky tejto analýzy boli publikované v prácach č.10.-11. uvedených v Zozname prác, boli tiež prezentované na domácich a zahraničných konferenciách (práca č.4.-9.,12.-13.) a referované na konferenciách v zahraničí (práca č.1.-2. v Zozname prác, časť Zahranické konferencie).

Ciele práce

Ciele práce boli sformulované nasledovne:

- skúmanie neštatistických fluktuácií metódou škálovacích faktoriálnych momentov v zrážkach relativistických jadier získaných jednotnou emulznou metodikou;
- porovnať výsledky analýzy pre to isté primárne jadro a tri rôzne spôsoby výpočtu - pomocou metódy horizontálnych, vertikálnych a zmiešaných faktoriálnych momentov pri rovnakej hybnosti primárneho jadra;
- porovnať výsledky analýzy pre experimentálne a modelové údaje;
- porovnať výsledky analýzy pre to isté primárne jadro pri rôznych hybnostiach;
- porovnať získané výsledky pre rôzne primárne jadrá s rovnakou hybnosťou.

1 Metóda analýzy

Na analýzu relativistických častíc produkovaných v zrážkach jadier v emulznom detektore bola použitá metóda škálovacích faktoriálnych momentov. Štandardný horizontálny faktoriálny moment (HFM) $F_e^{(H)}$ charakterizujúci prípad e je definovaný podľa [9] ako

$$F_e^{(H)} = M^{q-1} \sum_{m=1}^M \frac{F(n_{me}; q)}{[N_e^{(H)}(q)]}, \quad (1)$$

kde M je počet delení (binov s veľkosťou $\delta\eta$) celého intervalu pseudorapidity $\Delta\eta$, n_{me} je počet relativistických častíc v m -tom bine. V tomto prípade hovoríme o jednorozmernej analýze. Nevystredované a nenormalizované faktoriálne momenty sú dané nasledovne:

$$F(n_{me}; q) = n_{me}(n_{me} - 1)\dots(n_{me} - q + 1), \quad (2)$$

kde q je rád daného faktoriálneho momentu. Vertikálnym vystredovaním (1) dostaneme úplný vzťah pre $F^{(H)}(q)$ v tvare

$$F^{(H)}(q) = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E F_e^{(H)}(q), \quad (3)$$

kde E je celkový počet skúmaných prípadov. Menovateľ vo vzťahu (1) je daný ako

$$N_e^{(H)} = \sum_{m=1}^M n_{me}. \quad (4)$$

Pre niektoré zriedkavé prípady s výraznými maximami (píkmi) je doporučená vertikálna analýza. V tomto prípade normalizovaný štandardný vertikálny faktoriálny moment (VFM) charakterizujúci daný m -tý bin je definovaný podľa [9] ako

$$F_m^{(V)}(q) = M^{q-1} E^{q-1} \sum_{e=1}^E \frac{F(n_{me}; q)}{[N_m^{(V)}]^q}, \quad (5)$$

a horizontálne vystredovanie dá výsledný tvar

$$F^{(V)}(q) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M F_m^{(V)}(q). \quad (6)$$

Menovateľ vo vzťahu (5) je

$$N_m^{(V)} = \sum_{e=1}^E n_{me}. \quad (7)$$

Medzi horizontálnou a vertikálnou analýzou je možné tzv. zmiešanie, potom zmiešaný faktoriálny moment (ZFM) je podľa [9] definovaný nasledovným spôsobom

$$F^{(HV)}(q) = M^{q-1} E^{q-1} \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{e=1}^E F(n_{me}; q)}{[N^{(HV)}]^q}, \quad (8)$$

príčom menovateľ je rovný

$$N^{(HV)} = \sum_{m=1}^M \sum_{e=1}^E n_{me}. \quad (9)$$

Tieto metódy sú charakteristické pre tzv. jednorozmernú analýzu, kedy sú častice skúmané v intervale pseudorapidity $\Delta\eta$ a na jeho častiach - podintervaloch pri delení na M častí, t.j. $\delta\eta = \frac{\Delta\eta}{M}$.

2 Emulzný detektor

Spôsob detekcie častíc pomocou emulzného detektora patrí dnes už ku klasickým metódam spôsobu detekcie častíc. Samozrejme, v oblasti fyziky vysokých energií, keď vývoj postupuje smerom k ťažším jadrom a vyšším energiám primárnych jadier, nemôže táto metóda konkurovať moderným elektronickým systémom. Emulzný detektor má však ako každý detektor svoje výhody a nevýhody.

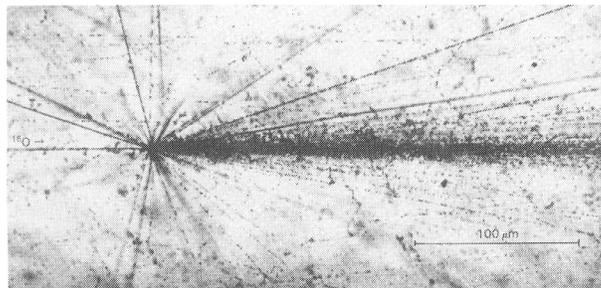
Medzi výhody patrí :

- úplné 4π uhlové pokrytie,
- dobré priestorové rozlíšenie ($\sim 1\mu m$),
- možnosť identifikácie náboja častíc na základe ionizácie,
- vysoká detekčná účinnosť,
- prenosnosť.

Nevýhodou je:

- problémy s identifikáciou častíc pri veľkých multiplicítach, čo vedie k malej štatistike v porovnaní s elektronickými experimentami,
- pracné a časovo zdĺhavé vyhodnocovanie údajov,
- obmedzenosť pri rekonštrukcii hybnosti,
- nemožnosť odlíšiť častice s kladným a záporným nábojom.

Na obrázku 1 je interakcia primárneho jadra ^{16}O s hybnosťou $200 A \text{ GeV}/c$ s jadrom emulzie. V práci sú použité experimentálne údaje získané pri horizontálnom



Obrázok 1: Interakcia primárneho jadra ^{16}O s hybnosťou $200 A \text{ GeV}/c$ s jadrom emulzie.

ožiarení emulzných blokov. Na základe metodiky bežne používanej v emulzných experimentoch sú nabité sekundárne častice rozdelené do nasledujúcich skupín:

- **s-častice** (shower particles) sú relativistické nabité častice ($Z = 1$) s $\beta > 0,7$ ($\beta = \frac{v}{c}$, v -rýchlosť častice, c - rýchlosť svetla), sú to najmä pióny a protóny. Počet s-častíc označujeme n_s ;

- **b-častice** (black particles) sú pomalé spektátorové fragmenty terčového jadra s kinetickou energiou $T < 26 MeV$. Dobeh týchto častíc v emulzii je menší ako 3 mm, ich počet označujeme n_b ;
- **g-častice** (grey particles) sú rýchle terčové fragmenty, najmä vyrazené protóny s kinetickou energiou z intervalu $26 MeV \leq T_p < 400 MeV$, ich dobeh v emulzii je väčší ako 3 mm, počet g-častíc označujeme n_g ;
- **h-častice** (heavy ionizing particles) sú silne ionizujúce častice, ich počet je daný súčtom b- a g-častíc : $N_h = n_b + n_g$;
- **f-častice** (fragments) sú nabitú fragmenty primárneho jadra so $Z \geq 1$, ich počet označujeme n_f .

Pre všetky častice je meraný polárny (Θ) a azimutálny uhol (Φ). Polárny uhol Θ pre každú dráhu je uhol medzi smerom nalietajúceho zväzku a danej dráhy. Azimutálny uhol Φ je uhol medzi projekciou danej dráhy v azimutálnej rovine (rovine kolmej na zväzok) a smerom zväzku. Pre každú relativistickú s -časticu je určená veličina pseudorapidita podľa vzťahu

$$\eta = -\ln\left(\tan \frac{\Theta}{2}\right). \quad (10)$$

Na základe existencie korelácie stredných multiplicít sekundárnych nabitých častíc od hodnoty sumárneho náboja Q nepreinteragovaných fragmentov primárneho jadra, resp. od stupňa centrality, je možné použiť multiplicity jednotlivých skupín sekundárnych častíc ako kritérium centrality zrážok. Toto kritérium, teda napríklad počet relativistických častíc n_s , bolo využité ako kritérium výberu centrálnych a semicentrálnych zrážok primárnych jadier s jadrami emulzie.

3 Výsledky analýzy

3.1 Interakcie jadier ^{28}Si s jadrami emulzie

Na analýzu boli použité experimentálne údaje získané pri horizontálnom ožiarení emulzných blokov zväzkom primárnych jadier ^{28}Si s hybnosťou 14,6 A GeV/c v Berkley National Laboratory (BNL). Detailný popis experimentu je uvedený v [10].

Fluktuácie relativistických častíc boli študované v intervale pseudorapidity $\Delta\eta = 0 - 5$. Hodnoty faktoriálnych momentov F_q , pre rád faktoriálneho momentu $q = 2 - 5$, boli vypočítané pomocou všetkých troch metód - metódy horizontálnych, vertikálnych a zmiešaných faktoriálnych momentov (HFM, VFM a ZFM) podľa vzťahov (3), (6) a (8). Ako bolo navrhnuté v [11], existencia závislosti podľa vzťahu

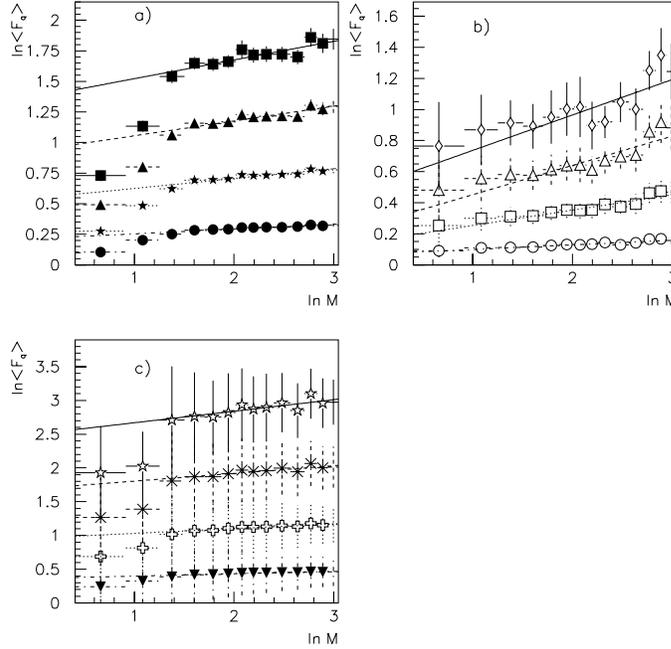
$$\langle F_q \rangle = \left(\frac{\Delta y}{\delta y}\right)^{\varphi_q}, \quad (11)$$

prícom takáto závislosť je obyčajne popísaná priamkou

$$\ln \langle F_q \rangle = const + \varphi_q \ln\left(\frac{1}{\delta y}\right), \quad (12)$$

môže poukazovať na prítomnosť neštatistických fluktuácií v produkcii sekundárnych častíc.

Výsledky sú uvedené na obrázku 2, kde sú znázornené závislosti $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ pre všetky tri metódy výpočtu. Z hodnôt uvedených v tab. 1 je vidieť, že



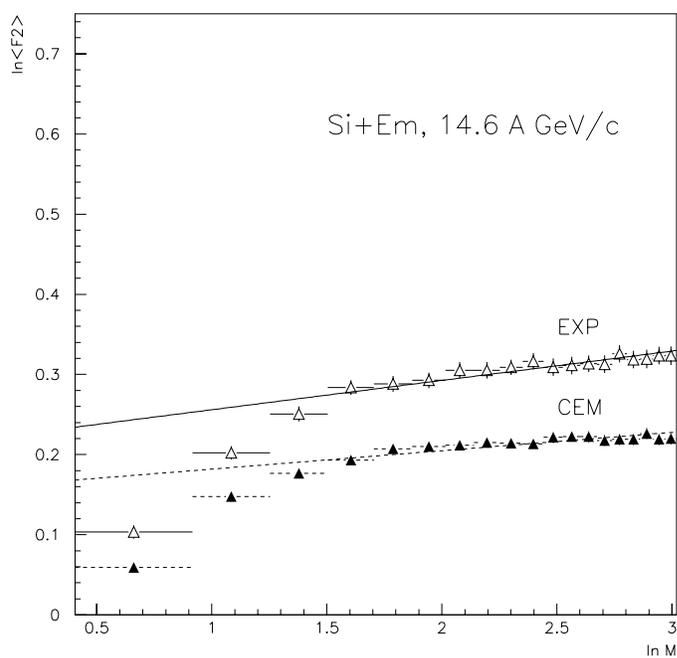
Obrázok 2: Závislosť $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ pre zrážky jadier ^{28}Si s jadrami emulzie určené metódou a) horizontálnych faktoriálnych momentov ; b) vertikálnych faktoriálnych momentov ; c) zmiešaných faktoriálnych momentov.

smernice priamok sú pre všetky tri spôsoby výpočtu v rámci chyby blízke a nenulové, čo poukazuje na prítomnosť neštatistických fluktuácií v zrážkach jadier $Si + Ag(Br)$ s hybnosťou 14,6 A GeV/c [11].

Tiež bola uskutočnená podrobná analýza modelových údajov a ich porovnanie s hodnotami získanými z experimentu. Na modelovanie bol použitý modifikovaný kaskádno-evaporačný model [12]. Na základe výsledkov kaskádno - evaporačného modelu porovnaných s experimentálnymi údajmi možno povedať, že modelové hodnoty sú nižšie ako hodnoty z experimentálnych údajov, čo je ilustrované na obrázku 3, kde je znázornená závislosť $\ln \langle F_2 \rangle$ od $\ln M$. Pre hodnoty $q \geq 3$ sú výsledky podobné.

Tabuľka 1: Hodnoty smerníc φ_q priamok závislostí $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ pre interakcie primárnych jadier ^{28}Si s hybnosťou 14.6 A GeV/c pre $q=2-5$ pomocou metódy HFM, VFM a ZFM.

	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5
HFM	$0,037 \pm 0,005$	$0,076 \pm 0,012$	$0,112 \pm 0,021$	$0,145 \pm 0,032$
VFM	$0,030 \pm 0,004$	$0,099 \pm 0,018$	$0,188 \pm 0,076$	$0,228 \pm 0,088$
MFM	$0,034 \pm 0,002$	$0,071 \pm 0,005$	$0,114 \pm 0,014$	$0,171 \pm 0,034$

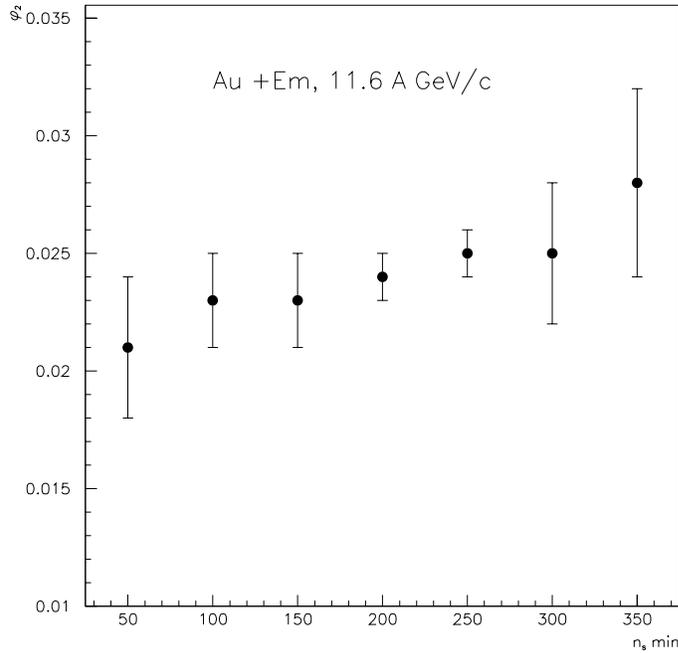


Obrázok 3: Závislosť $\ln \langle F_2 \rangle$ od $\ln M$ pre zrážky jadier ^{28}Si s hybnosťou 14,6 A GeV/c s jadrami emulzie určená metódou horizontálnych faktoriálnych momentov pre experiment a kaskádno-evaporačný model (CEM).

Ďalšie porovnania boli uskutočnené pre interakcie jadier ^{28}Si s hybnosťou 14,6 a 4,5 A GeV/c, ktoré tiež poukazujú na prítomnosť neštatistických fluktuácií pre oba súbory experimentálnych údajov.

3.2 Interakcie jadier ^{197}Au s jadrami emulzie

Pre analýzu neštatistických fluktuácií častíc produkovaných v centrálnych zrážkach primárnych jadier ^{197}Au s hybnosťou 11,6 A GeV/c v emulznom detektore bol použitý súbor 1185 interakcií a pre ďalšiu analýzu bolo vybraných 261 centrálnych interakcií, t.j. 22 % z celkového počtu. Podrobný popis experimentu je uvedený v prácach [13]-[17]. Ako kritérium výberu centrálnych interakcií bol použitý počet relativistických s -častíc n_s a pre analýzu boli vybrané interakcie s počtom s -častíc väčším ako 100. Výsledky potvrdili prítomnosť neštatistických fluktuácií všetkými použitými metódami výpočtu (t.j. metódou HFM, VFM a ZFM) tak ako v prípade jadier ^{28}Si . Hodnoty smerníc získané metódou vertikálnych faktoriálnych momentov sú v prípade zrážok jadier ^{197}Au nižšie ako hodnoty získané ďalšími dvoma metódami.



Obrázok 4: Závislosť φ_2 od stupňa centrality pre zrážky jadier ^{197}Au s hybnosťou 11,6 A GeV/c jadrami emulzie pomocou metódy horizontálnych faktoriálnych momentov.

Hodnoty získané z modelových výpočtov (kaskádno-evaporačný a FRITIOF)

sú nižšie ako hodnoty z experimentálnych údajov. Taktiež bola zistená rastúca závislosť hodnôt smerníc priamok $\ln \langle F_q \rangle = \alpha_q + \varphi_q \ln M$ pre rôzne hodnoty stupňa centrality analyzovaných prípadov. Na obrázku 4 je znázornená závislosť smernice φ_2 od stupňa centrality študovaných prípadov. Výpočet bol uskutočnený metódou HFM postupne pre interakcie s $n_s > 50, 100, 150, 200, 250, 300$ a 350 . Je vidieť, že hodnota smernice φ_2 rastie s rastúcou hodnotou počtu *s-častíc*, t.j. so stupňom centrality. Podobný trend bol zistený aj pre smernice φ_q vyššieho rádu.

3.3 Interakcie jadier ^{16}O s jadrami emulzie

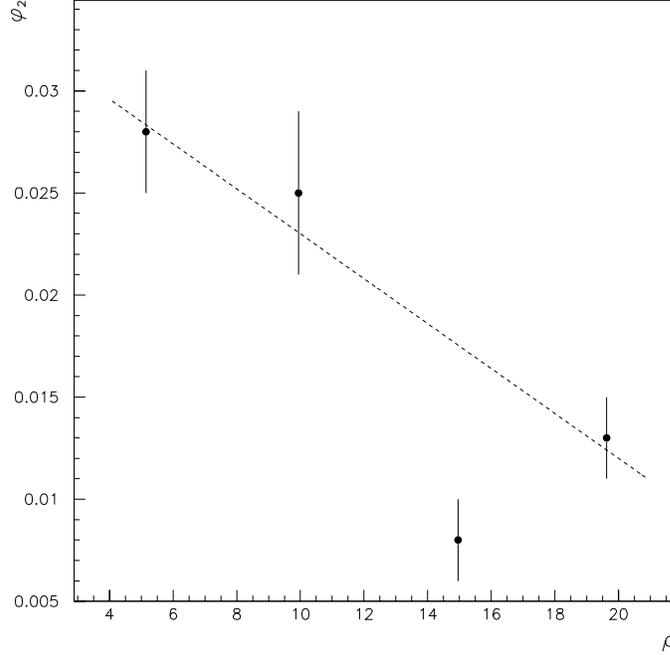
Interakcie primárnych jadier ^{16}O s jadrami emulzie boli študované pri rôznych hybnostiach - 4,5 A GeV/c (Dubna) a 14,6; 60 a 200 A GeV/c (kolaborácia EMU01). Detaily experimentálneho usporiadania boli publikované v [18] - [23].

V súlade s výsledkami v [24] bola uskutočnená analýza horizontálnych faktoriálnych momentov pre rôzne experimentálne súbory so zachovaním veľkosti intervalu $\delta\eta_{min} = 0,1$ a $\delta\eta_{max} = 1$, čo viedlo k tomu, že údaje pri rôznych hybnostiach nalietaujúcich jadier boli spracované s odlišnými počtami delení M pseudorapiditného intervalu. V tabuľke 2 sú uvedené hodnoty smerníc φ_q závislostí $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ pre všetky štyri experimentálne súbory údajov a tiež počet binov M pre daný experiment, resp. interval pseudorapidity. V uvedenej tabuľke sú tiež porovnané výsledky predloženej práce s publikovanými výsledkami [25] pri hybnostiach 60 a 200 A GeV/c a v rámci chýb je vidieť dobrý súhlas.

Tabuľka 2: Hodnoty smerníc φ_q priamok závislostí $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ získané metódou HFM pre rôzne hybnosti primárnych jadier ^{16}O a rôzne počty binov M , hodnoty v zátvorkách boli publikované v [25].

p[A GeV/c]	4,5	14,6	60	200
M	4-40	5-50	6-64	8-76
φ_2	$0,028 \pm 0,003$	$0,025 \pm 0,004$	$0,008 \pm 0,002$ ($0,008 \pm 0,001$)	$0,013 \pm 0,002$ ($0,014 \pm 0,001$)
φ_3	$0,086 \pm 0,009$	$0,073 \pm 0,010$	$0,020 \pm 0,005$ ($0,016 \pm 0,003$)	$0,037 \pm 0,005$ ($0,038 \pm 0,002$)
φ_4	$0,159 \pm 0,019$	$0,156 \pm 0,020$	$0,036 \pm 0,008$ ($0,032 \pm 0,006$)	$0,074 \pm 0,009$ ($0,074 \pm 0,004$)
φ_5	$0,180 \pm 0,046$	$0,270 \pm 0,043$	$0,047 \pm 0,029$ ($0,077 \pm 0,014$)	$0,125 \pm 0,048$ ($0,130 \pm 0,011$)

Údaje zo zrážok $^{16}\text{O} + Em$ umožnili skúmať energetickú, resp. multiplicitnú závislosť neštatistických fluktuácií charakterizovanú parametrami α_q a φ_q . Závislosť



Obrázok 5: Závislosť parametra fitu φ_2 od hustoty častíc ρ .

týchto parametrov od hustoty častíc ρ , definovanej ako stredný počet častíc pripadajúci na jednotkový interval pseudorapidity, ukazuje nasledujúce trendy:

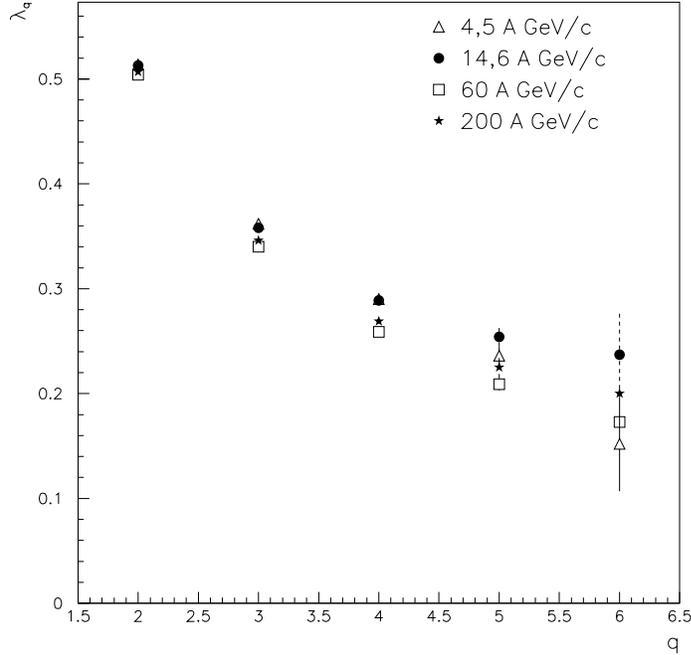
- lineárny rast α_q s rastúcou hodnotou ρ , pre $q = 2 - 5$, a od istej hodnoty ρ náznak nasýtenia
- klesajúcu závislosť φ_q od ρ , ilustrovanú na obrázku 5 pre φ_2 , čo je v dobrom súlade s trendom publikovaným v [22].

V práci [26] bolo navrhnuté, že signály netermálneho fázového prechodu môžu byť študované pomocou závislosti intermitenčného parametra λ_q od q . Prípadná existencia minima λ_k zodpovedajúceho určitému q_k uvedenej funkčnej závislosti by, podľa [27, 28], mohla mať zaujímavú teoretickú interpretáciu - mohla by byť signálom netermálneho fázového prechodu hmoty, resp. koexistencie dvoch fáz. Intermitenčný parameter λ_q je podľa [27, 28] definovaný ako

$$\lambda_q = \frac{\varphi_q + 1}{q} \quad (13)$$

V našom prípade hodnoty λ_q klesajú s rastúcou hodnotou q ako je vidieť na obrázku 6, ale nebola zistená prítomnosť jasného minima λ_k .

Zrážky jadier ^{16}O s rôznou hybnosťou (4,5 - 200 A GeV/c) boli študované pomocou metódy horizontálnych faktoriálnych momentov. Pre všetky skúmané súbory



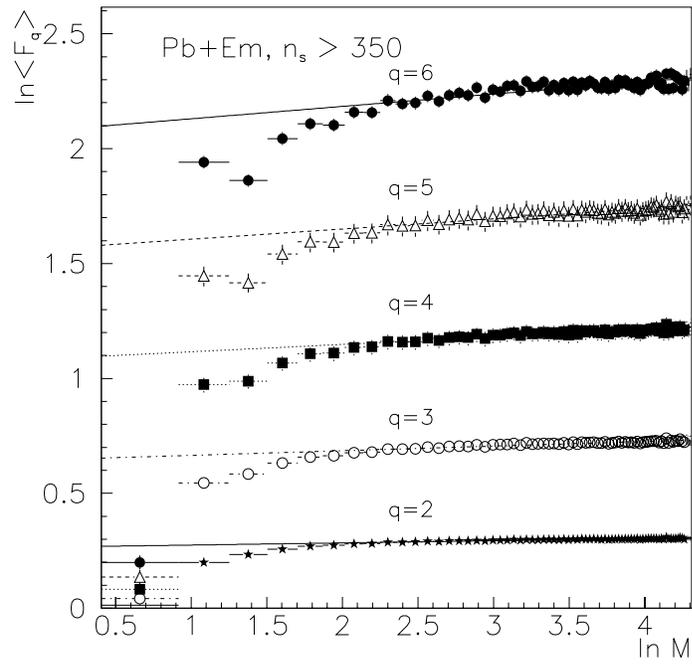
Obrázok 6: Závislosť intermitenčného parametra λ_q od q .

bola preukázaná prítomnosť neštatistických fluktuácií v produkcii sekundárnych relativistických častíc.

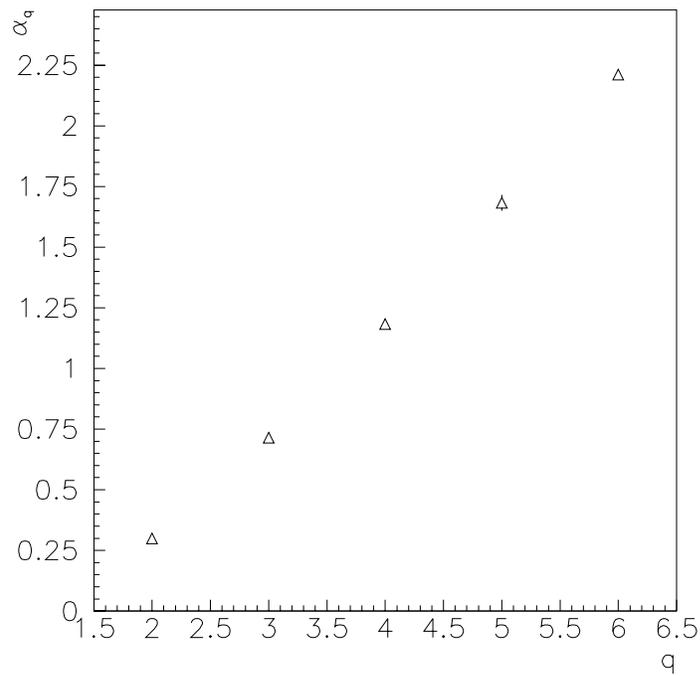
3.4 Interakcie jadier ^{208}Pb s jadrami emulzie

Tiež boli analyzované interakcie primárnych jadier ^{208}Pb s hybnosťou 158 A GeV/c s jadrami emulzie. Fotoemulzné bloky boli horizontálne ožiarené primárnymi jadrami Pb na urýchľovači SPS CERN, podrobné údaje o experimente boli publikované v [29] - [31]. Celkovo bolo zmeraných 628 interakcií. Závislosti $\ln \langle F_q \rangle = \alpha_q + \varphi_q \ln M$ boli určené iba metódou horizontálnych faktoriálnych momentov. Výsledky sú znázornené na obrázku 7 pre interakcie s $n_s > 350$, $q = 2 - 6$, v intervale pseudorapidity $\Delta\eta = 0 - 7,4$ a fitované pre $M = 7 - 74$, čo odpovedá $\delta\eta = 1,057 - 0,1$. Výsledky analýzy poukazujú na prítomnosť neštatistických fluktuácií produkovaných relativistických častíc.

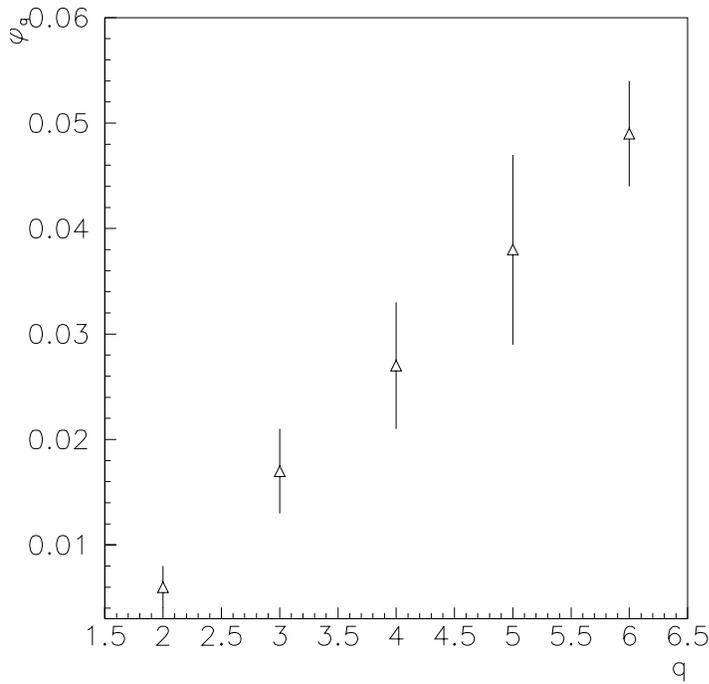
Takisto ako pre zrážky jadier ^{16}O aj pre primárne jadrá ^{208}Pb boli skúmané závislosti parametrov α_q a φ_q od hustoty častíc ρ a od rádu faktoriálneho momentu q pre skupiny interakcií s rôznou centralitou. Na obrázku 8 je uvedená závislosť α_q od q pre interakcie s $n_s > 500$, ktorá ukazuje na lineárny rast α_q s rastúcou hodnotou q . Na ďalšom obrázku 9 je znázornená závislosť φ_q od q pre tú istú skupinu interakcií. Závislosti oboch parametrov od q sú v súlade s výsledkami publikovanými v [32, 33].



Obrázok 7: Závislosť $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ pre interakcie primárnych jadier Pb v emulznom detektore, $n_s > 350$.



Obrázok 8: Závislosť parametra fitu α_q od rádu faktoriálneho momentu q .



Obrázok 9: Závislosť parametra fitu φ_q od rádu faktoriálneho momentu q .

Tiež bola študovaná závislosť intermitenčného parametra λ_q od rádu q faktoriálneho momentu F_q , definovaného podľa vzťahu (13). Pre interakcie $Pb + Em$ s $n_s > 100$ bol zistený slabý náznak existencie minima λ_k závislosti λ_q od q pre hodnotu $q = 5$.

3.5 Interakcie rôznych primárnych jadier s rovnakou hybnosťou

Prvú skupinu analyzovaných údajov tvoria experimenty zrážok rôznych primárnych jadier s hybnosťou 4,1 - 4,5 A GeV/c v emulznom detektore. Výpočet bol uskutočnený metódou horizontálnych faktoriálnych momentov v intervale pseudorapidity $\Delta\eta = 0 - 4$, $M = 4 - 20$ a $q = 2 - 5$.

Tabuľka 3: Hodnoty smerníc priamok závislosti $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ pre interakcie rôznych primárnych jadier s hybnosťou 4,1 - 4,5 A GeV/c získané metódou HFM.

	^{16}O	^{22}Ne	^{28}Si	^{32}S
φ_2	$0,041 \pm 0,006$	$0,044 \pm 0,005$	$0,044 \pm 0,009$	$0,041 \pm 0,007$
φ_3	$0,099 \pm 0,015$	$0,101 \pm 0,012$	$0,117 \pm 0,025$	$0,091 \pm 0,019$
φ_4	$0,178 \pm 0,029$	$0,163 \pm 0,023$	$0,224 \pm 0,051$	$0,149 \pm 0,035$
φ_5	$0,270 \pm 0,048$	$0,227 \pm 0,037$	$0,336 \pm 0,092$	$0,206 \pm 0,056$

Výsledky pre rôzne primárne jadrá sú uvedené v tabuľke 3. Hodnoty smerníc

priamok závislosti $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ sú pre rôzne primárne jadrá podobné.

Tabuľka 4: Hodnoty smerníc priamok závislosti $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ pre interakcie rôznych primárnych jadier s hybnosťou 11,6 - 14,6 A GeV/c získané metódou HFM.

	^{197}Au	^{28}Si	^{16}O
φ_2	$0,032 \pm 0,002$	$0,037 \pm 0,005$	$0,040 \pm 0,004$
φ_3	$0,063 \pm 0,005$	$0,076 \pm 0,012$	$0,094 \pm 0,017$
φ_4	$0,101 \pm 0,012$	$0,112 \pm 0,021$	$0,163 \pm 0,031$
φ_5	$0,147 \pm 0,024$	$0,145 \pm 0,032$	$0,236 \pm 0,047$

Ďalšiu skupinu predstavujú experimentálne údaje pre primárne jadrá s hybnosťou v intervale 11,6 - 14,6 A GeV/c. Metódou horizontálnych faktoriálnych momentov boli získané hodnoty smerníc φ_q , ktoré sú uvedené v tabuľke 4. Porovnanie výsledkov naznačuje, že pre primárne jadrá s hmotnosťou $A = 16 - 197$ hodnoty smerníc φ_q klesajú s rastúcou hmotnosťou. Tento trend je v súlade so závislosťou φ_2 od hustoty častíc ρ pre zrážky jadier ^{16}O v emulznom detektore, uvedenou na obrázku 5 v 3.3. Podobný trend bol tiež publikovaný v [24, 22].

4 Záver

V práci boli systematicky preštudované experimentálne údaje získané na KJSF PF UPJŠ v rámci Dubnenskej a EMU01 kolaborácie z hľadiska možnej prítomnosti neštatistických fluktuácií v produkcii sekundárnych relativistických častíc produkovaných v zrážkach jadier v emulznom detektore. Po prvý krát bola vykonaná komplexná analýza experimentálnych údajov získaných jednotnou emulznou metodikou, zahŕňajúcich široký interval hmotností primárnych jadier (^{16}O , ^{22}Ne , ^{28}Si , ^{32}S , ^{197}Au a ^{208}Pb) a široký interval hybností primárnych jadier od 4,1 A GeV/c po 200 A GeV/c. Ako metóda skúmania bola použitá metóda škálovacích faktoriálnych momentov - horizontálnych, vertikálnych a zmiešaných faktoriálnych momentov.

Výsledky predloženej práce možno zhrnúť nasledovne:

- získané výsledky poukazujú na intermitentné správanie v produkcii sekundárnych relativistických častíc v zrážkach jadier v emulznom detektore, teda na prítomnosť neštatistických fluktuácií v tejto produkcii, pre všetky skúmané experimentálne údaje. Pre všetky experimentálne údaje bola preukázaná existencia nenulových smerníc φ priamok závislostí $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$, kde q je rád príslušného faktoriálneho momentu F_q , M je počet binov, na ktorý bol postupne delený interval pseudorapidity $\Delta\eta$ skúmaných relativistických častíc;
- porovnanie výsledkov získaných rôznymi metódami výpočtu pri rovnakej hybnosti primárnych jadier - metódou horizontálnych, vertikálnych a zmiešaných

faktoriálních momentov pre primárne jadrá ^{28}Si s hybnosťou 14,6 A GeV/c a ^{197}Au s hybnosťou 11,6 A GeV/c ukazuje, že výsledky získané rôznymi metódami sa v rámci chýb výrazne nelíšia;

- výsledky analýzy hodnôt získaných z modelových výpočtov pomocou modifikovaného kaskádno-evaporačného modelu a modifikovaného modelu FRITIOF ukazujú, že hodnoty z modelových údajov sú podstatne nižšie ako z experimentálnych, a teda oba modely slabo popisujú skúmané veličiny, zdroje týchto fluktuácií nie sú v modeloch zahrnuté;
- z výsledkov analýzy zrážok primárnych jadier ^{16}O s hybnosťou 4,5; 14,6; 60 a 200 A GeV/c vyplýva, že
 - hodnoty smerníc φ_2 priamok závislosti $\ln \langle F_2 \rangle = \alpha_2 + \varphi_2 \ln M$ klesajú s rastúcou hodnotou hustoty častíc ρ (stredný počet častíc na jednotkový interval pseudorapidity), podobný výsledok bol zistený aj pri analýze zrážok jadier ^{208}Pb s hybnosťou 158 A GeV/c;
 - závislosť α_2 od hustoty častíc ρ je rastúca pre primárne jadrá ^{16}O a ^{208}Pb ;
- výsledky štúdia závislosti tzv. intermitenčného parametra λ_q od rádu q daného faktoriálneho momentu pre primárne jadrá ^{16}O s hybnosťou 4,5, 14,6, 60 a 200 A GeV/c a ^{208}Pb s hybnosťou 158 A GeV/c neukázali jasnú existenciu minima tejto závislosti, ktorá by poukazovala na možný netermálny fázový prechod;
- výsledky analýzy získané metódou horizontálnych faktoriálních momentov pre rôzne primárne jadrá ukazujú, že v oblasti hybností 4,1-4,5 A GeV/c hodnoty smerníc φ_q priamok závislosti $\ln \langle F_q \rangle$ od $\ln M$ sú podobné, pričom hmotnosti primárnych jadier boli v intervale $A = 16 - 32$. Pre hybnosti primárnych jadier 11,6 - 14,6 A GeV/c hodnoty smerníc klesajú s rastúcou hodnotou hmotnosti primárneho jadra A , kde $A = 16 - 197$.

Podobný typ analýzy, teda štúdium neštatistických fluktuácií produkovaných relativistických častíc bude možné využiť pri skúmaní zrážok ťažkých iónov v pripravovaných experimentoch ALICE/CERN.

5 Summary

Results of the search for nonstatistical multiplicity fluctuations of produced relativistic particles are presented. Such fluctuations may be used to signal the formation of a quark gluon plasma in the early stage of heavy ion interactions at high energies. Three methods of scaled factorial moments - horizontal, vertical and mixed ones have been used for this purpose. The scaled factorial moments F_q of the order of q have been studied as a function of the pseudorapidity bin size, parametrized in the form of $\ln \langle F_q \rangle = \alpha_q + \varphi_q \ln M$, where M is the number of bins.

Experimental data were obtained by the same standard emulsion method using different primary nuclei (^{16}O , ^{22}Ne , ^{28}Si , ^{32}S , ^{197}Au and ^{208}Pb) at momenta of 4.1 - 200 A GeV/c. Only the relativistic particles produced in central and semicentral collisions entered the analysis.

The results of analysis show an evidence for the presence of intermittent behaviour in all experimental data samples. The values of the slopes φ_q obtained by all three methods of analysis are similar for ^{28}Si induced interactions. The values of the slopes obtained from the modified cascade evaporation and FRITIOF models are fairly smaller than those for experimental data. The dependence of parameters α_q and φ_q on the particle density per unit pseudorapidity ρ has been studied for ^{16}O and ^{208}Pb induced interactions. While the α_q dependence can be characterized as rather increasing, φ_q decreases with ρ . Both parameters α_q and φ_q increase with the order of factorial moments q . The dependences of intermittency parameter λ_q on q have been studied for ^{16}O and ^{208}Pb induced interactions, but no clear minimum has been found. The values of the slopes φ_q for different primary nuclei masses of $A = 16 - 32$ are similar at Dubna energies and they decrease with the increasing primary nuclei masses for studied range of $A = 16 - 197$ at BNL energies.

Zoznam prác

1. Adamovich M. I.,..., Vrláková J. et al.:
Charged particle multiplicity and pseudorapidity density distributions in ^{16}O -, ^{28}Si - and ^{197}Au -induced nuclear interactions at 14.6 and 11.6 A GeV/c
Nuclear Physics A593, 1995, 535-549
2. Adamovich M.I.,..., Vrláková J. et al.:
Charged particle density distributions in Au induced interactions with emulsion nuclei at 10.7 A GeV
Physics Letters B352, 1995, 472-478
3. Adamovich M.I.,..., Vrláková J. et al.:
Produced particle multiplicity dependence on centrality in nucleus-nucleus collisions
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 22, 1996, 1469-1481
4. Vrláková J.:
Scaled Factorial Moment Analysis of Relativistic Nuclear-Emulsion Collisions
Proceedings of the XVII Meeting of the EMU01 Collaboration and perspectives of the emulsion technique in the experiments at the Nuclotron relativistic nuclear beams, May 18-20,1999, LHE JINR, Dubna, Russia, p.127-135
5. Vrláková J., Vokál S.:
Scaled factorial moment analysis of $^{28}Si + Ag(Br)$ interactions in emulsion detector

Proceedings of Scientific Conference organised on the occasion of 30th anniversary of the foundation of Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University Košice, Sept. 21-22, 1999, p. 242-247

6. Vrláková J., Vokál S.:
Štúdium faktoriálnych momentov v zrážkach relativistických jadier v emulznom detektore
Zborník 13. konf. slovenských a českých fyzikov, 23. - 26.8.1999, Zvolen, 2000, str. 87 -89
7. Vrláková J. a Vokál S.:
Neštatistické fluktuácie v zrážkach jadier ^{197}Au v emulznom detektore
Zborník príspevkov 11. konferencie slovenských fyzikov, 4. - 6.9.2000, Zvolen, str. 37
8. Vrláková J., Just L., Síleš E., Vokál S.:
Faktoriálne momenty v zrážkach relativistických jadier zmeraných jednotnou emulznou metodikou
Zborník príspevkov 11. konferencie slovenských fyzikov, 4. - 6.9.2000, Zvolen, str. 38
9. Vrláková J., Dirner A., Just L., Vokál S.:
Štúdium neštatistických fluktuácií v zrážkach relativistických jadier v emulzii
Zborník 12. konf. slovenských fyzikov, Smolenice, 3.-5.9.2001, str. 96-97
10. Adamovich M.I.,..., Vrláková J. et al.:
Factorial Moments of ^{28}Si Induced Interactions with Ag(Br) Nuclei
APH N.S., Heavy Ion Physics 13 (2001) 213-221
11. Vrláková J. and Vokál S.:
Scaled factorial moment analysis of Au+Em interactions
Acta Electrotechnica et Informatica, No.3, vol.2, 2002, 162-164
12. Vrláková J. a Vokál S.:
Neštatistické fluktuácie v zrážkach relativistických jadier v emulznom detektore
Zborník príspevkov 14. konferencie českých a slovenských fyzikov, 9.-12.9.2002, ZU Plzeň, ČR, str.178-183
13. Vrláková J. a Vokál S.:
Faktoriálne momenty v zrážkach jadier v emulznom detektore
Zborník príspevkov 13. konferencie slovenských fyzikov, 25.-28.8.2003, Smolenice, 2003, str.167-168

Zahraničné konferencie

1. Vrláková J.
Cascade calculations of ^{28}Si and ^{197}Au collisions in emulsion at BNL energies
12th EMU01 Collaboration Meeting, Lund, Sweden, June 16-18,1993
Dĺžka prednášky : 20 min
2. Vrláková J.
Scaled Factorial Moment Analysis of Relativistic Nuclear-Emulsion Collisions
XVII Meeting of the EMU 01 Collaboration and perspectives of the emulsion
technique in the experiments at the Nuclotron relativistic nuclear beams, May
18-20, LHE JINR Dubna, 1999
Dĺžka prednášky: 20 min

Abstrakty ved. prác v zborníkoch konferencií

1. Vrláková J.
Jadrové interakcie iónov ^{28}Si v emulzii pri 14,6 AGeV
Zborník prednášok 11. konferencie českých a slovenských fyzikov, Žilina, 30.8-
3.9.1993, str.21
2. Vrláková J.
Fragmentácia jadier ^{197}Au v emulzii pri 10,7 GeV na nukleón
Zborník prednášok 11. konferencie českých a slovenských fyzikov, Žilina, 30.8-
3.9.1993, str.22

Zoznam použitej literatúry

- [1] Burnett T.H. et al., JACEE coll., Phys. Rev. Lett. 50(1983)2062
- [2] Ludlam T. and Slansky R., Phys. Rev. D8(1973)1408
- [3] Slansky R., Phys. Rep. 11C(1974)99-188
- [4] Rushbrooke J.G., Contribution to the 6th High Energy Heavy Ion Study, Berkeley, 1983
- [5] Carlson P., Proc. of 4th Workshop on pp Physics, Bern(1984)286, Cern Yellow Report 84-09
- [6] Adamus M. et al., EHS/NA22 coll., Phys. Lett. B185(1987)200
- [7] Jacob M., In Search of Quark Gluon Plasma, Springer Verlag(1985)
- [8] Adamovich M.I. et al., Phys. Rev. Lett. 65(1990)

- [9] Blažek M., Int. Journal of Mod. Phys. A12(1997)839
- [10] Adamovich M.I. et al., Preprint E1-92-569, Dubna, 1992
- [11] Bialas A. and Peschanski R., Nucl. Phys. B273(1986)703
- [12] Bondarenko A.I. et al., Preprint JINR P1-98-155, Dubna, 1998
- [13] Adamovich M.I. et al.(EMU01 col.), Phys. Lett. B338(1994)397
- [14] Adamovich M.I. et al.(EMU01 col.), Phys.Lett.B352(1995)472
- [15] Adamovich M.I. et al.(EMU01 col.), Z. Phys. A359(1997)277
- [16] Adamovich M.I. et al., Eur. Phys. J. A1(1998)77
- [17] Adamovich M.I. et al., Eur. Phys. J. A2(1998)61
- [18] Adamovich M.I. et al.(EMU01 col.), Z. Phys. C56(1992)509
- [19] Adamovich M.I. et al.(EMU01 col.), Phys.Lett. B262(1991)369
- [20] Adamovich M.I. et al., Z. Phys. C49(1991)395
- [21] Adamovich M.I. et al., Z. Phys. C55(1992)235
- [22] Wilkes R.J.et al. (EMU01 col.), Nucl. Phys. A544(1992)153c
- [23] Vokál S. et al., Proc. of 11th EMU01 Meeting, Dubna, Russia, May 1992, p.228
- [24] Wosiek B., Raport NR 1533/PH, Cracow, February 1991
- [25] Jain P.L. et al., Phys. Rev. C48(1993)517
- [26] Bialas A. and Zaleswski K., Phys. Lett. B238(1990)413
- [27] Peschanski R., Int. Mod. Phys. A6(1990)368
- [28] Ghosh D. et al., Europhys. Lett. 41(1998)371
- [29] Adamovich M.I. et al., Proc. of XVII Meeting of the EMU01 col. and perspectives of the emulsion techniques in the experiments at the Nuclotron relativistic nuclear beams, May 18-20,1999, LHE JINR, Dubna, Russia, p.143
- [30] Gaitinov A.S. et al., Proc. of XVII Meeting of the EMU01 col. and perspectives of the emulsion techniques in the experiments at the Nuclotron relativistic nuclear beams, May 18-20,1999, LHE JINR, Dubna, Russia, p.103
- [31] Lehocká S., Vokál S., Kravčáková A., Orlova G.I., Zborník príspevkov 13.konf. slovenských fyzikov,25.-28.8.2003, Smolenice, 2003, str.171

[32] Wosiek B., *Acta Phys. Slovaca* 46(1996)531

[33] Dabrowska A. et al., *Nucl. Phys. A*633(1998)357