

RNDr. Sabina Lehocká

Autoreferát dizertačnej práce

Centrálne zrážky relativistických jadier

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

Košice 2008

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej a subjadrovej fyziky Prírodovedeckej fakulty, Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach.

Predkladateľ: RNDr. Sabina Lehocká
Katedra jadrovej a subjadrovej fyziky
Prírodovedecká fakulta UPJŠ
040 01 Košice

Školiteľ: Doc. RNDr. Stanislav Vokál, DrSc.
Prírodovedecká fakulta UPJŠ

Oponenti:
.....
.....

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa

.....

pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce 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 UK, 842 48 Bratislava

Úvod

Predkladaná práca sa zaoberá skúmaním azimutálnych prstencových štruktúr produkovaných v interakciách relativistických jadier vo fotoemulznom detektore. Tento jav bol pozorovaný v časticovej fyzike pred viac ako štvrtstoročím v experimentoch s kozmickými lúčmi [1, 2] a neskôr bol zaznamenaný aj v experimentoch na urýchľovačoch [3, 4, 5], kde sa pozorovali špecifické jadro-jadrové zrážky s prstencovými subštruktúrami v azimutálnej rovine sekundárnych častíc. Tieto tzv. ring-like štruktúry boli zo začiatku interpretované [6, 7] na základe analógie s Čerenkovovým žiarením. Podmienkou vzniku Čerenkovovho žiarenia je, aby rýchlosť nabitej častice bola väčšia ako je rýchlosť svetla v danom prostredí. Ak si predstavíme zhluk elektrónov, ktoré prechádzajú cez prostredie s indexom lomu väčším ako 1, tak vyžiarené fotóny vytvárajú kruh v rovine kolmej na pohyb elektrónov, t.j. fotóny sú emitované pod istým polárnym uhlom. Analogicky pre hadróny možno nalietať jadro považovať za zhluk navzájom viazaných kvarkov, z ktorých každý môže emitovať gluóny pri prechode cez terčové jadro [8]. Uhol emisie súvisí s indexom lomu prostredia, v našom prípade jadrovej hmoty. Toto by mohol byť jeden zo spôsobov, ako zmerať index lomu jadrovej hmoty. Ten sa bude meniť v prípade fázového prechodu hadrónovej hmoty na kvarkovo-gluónovú plazmu, alebo v prípade iných zmien základných charakteristík jadrovej hmoty. V súčasnosti sa objavujú práce, v ktorých sa autori snažia tento jav vysvetliť pomocou teórie Machových rázových vln [9].

Na analýzu sa použili experimentálne údaje, ktoré boli získané jednotnou metódou v zrážkach relativistických jadier v jadrovom emulznom detektore v rámci kolaborácie EMU01. V predkladanej práci sa študovali azimutálne prstencové štruktúry v interakciách jadier olova ^{208}Pb pri 158 GeV/c na nukleón (experiment EMU12) [10] a jadier zlata ^{197}Au pri 11,6 GeV/c na nukleón (experiment E863) [11]. V rámci kolaborácie EMU01 bola navrhnutá aj metóda analýzy prstencových štruktúr pomocou parametra S_2 [12]. Boli však skúmané len stredné hodnoty tohto parametra [3]. Komplexná analýza experimentálnych údajov v rozsahu, v akom sa venuje prstencovým štruktúram táto dizertačná práca, doposiaľ nebola vykonaná.

Hlavným ťažiskom práce sú posledné dve kapitoly. V piatej kapitole sú predstavené výsledky analýzy prstencových štruktúr pomocou parametra S_2 v interakciách jadier olova ^{208}Pb a jadier zlata ^{197}Au s jadrami fotoemulzie. Boli skúmané aj jednotlivé parametre týchto prstencových štruktúr: veľkosť štruktúry v jednotkách pseudorapidity, hustota častíc v štruktúre a umiestnenie prstencovej štruktúry na pseudorapiditynej osi v závislosti od centrality zrážky a od násobnosti častíc v prstencovej štruktúre. Šiesta kapitola obsahuje výsledky štúdia prstencových štruktúr v jednotlivých centrálnych prípadoch zrážok zvlášť, tzv. „Event by Event“ analýzy.

1 Ciele dizertačnej práce

1. Štúdium štruktúr typu „ring-like“ v emisii relativistických sekundárnych častíc na experimentálnych dátach kolaborácie EMU01:
 - interakcie jadier ^{208}Pb s jadrami fotoemulzie $^{108}\text{Ag}(^{80}\text{Br})$ pri $158\text{ GeV}/c$ na nukleón (Experiment EMU12 na SPS v CERN-e),
 - interakcie jadier ^{197}Au s jadrami fotoemulzie $^{108}\text{Ag}(^{80}\text{Br})$ pri $11,6\text{ GeV}/c$ na nukleón (Experiment E863 na AGS v BNL).
2. Vykonalie modelových výpočtov a porovnanie s experimentálnymi výpočtami.

2 Experiment

V predkladanej práci sú použité experimentálne údaje získané pri horizontálnom ožiarení emulzných blokov NIKFI BR-2 zväzkami jadier olova ^{208}Pb s hybnosťou $158\text{ GeV}/c$ na nukleón na urýchľovači SPS v CERN-e a zväzkami jadier zlata ^{197}Au s hybnosťou $11,6\text{ GeV}/c$ na nukleón na urýchľovači AGS v Brookhavene. Fotoemulznou metódou boli v oboch experimentoch zmerané multiplicity všetkých nabitých častíc, polárne a azimutálne uhly častíc a bol určený náboj fragmentov primárneho jadra. Pre každú relativistickú časticu bola vypočítaná veličina pseudorapidita, ktorá je daná vzťahom $\eta = -\ln(\tan \frac{\theta}{2})$, kde θ je polárny uhol. Detaily daných experimentov možno nájsť v [10] a [11].

Celkovo bolo zmeraných 628 prípadov interakcií jadier olova ^{208}Pb s fotoemulziou. Pri analýze prstencových štruktúr boli experimentálne údaje rozdelené do troch tried podľa multiplicity relativistických sekundárnych častíc N_s v danom prípade: $350 \leq N_s < 700$, $700 \leq N_s < 1000$ a $N_s \geq 1000$. Toto multiplicitné kritérium je v tretej kapitole dizertačnej práce zdôvodnené na základe závislosti počtu relativistických sekundárnych častíc N_s od zrážkového parametra b získanej z výpočtov podľa modelu FRITIOF [13]. Kritérium $N_s \geq 350$ vyberá semicentrálne a centrálné prípady, kedy jadro olova interagovalo s najťažšími jadrami fotoemulzie, brómom a striebrom. Centrálné interakcie so zrážkovým parametrom $b = (0 - 4)\text{ fm}$ spĺňajú kritérium $N_s \geq 1000$. Pomocou modelu FRITIOF [13] bolo vygenerovaných 1000 prípadov interakcií jadier olova.

Z celkového počtu 1185 zmeraných prípadov interakcií jadier zlata ^{197}Au s jadrami fotoemulzie boli na analýzu prstencových štruktúr použité prípady spĺňajúce kritérium: $100 \leq N_s < 200$, $200 \leq N_s < 300$ a $N_s \geq 300$. Podmienka pre počet relativistických sekundárnych častíc v danej interakcii $N_s \geq 300$ vydeľuje najcentrálnejšie prípady zrážok so zrážkovým parametrom $b = (0 - 6)\text{ fm}$. Kvôli porovnaniu experimentálnych dát s modelovými bolo vygenerovaných 1196 prípadov interakcií jadier zlata s fotoemulziou.

3 Metóda fyzikálnej analýzy

Pri analýze prstencových štruktúr bola použitá metóda [12], ktorá má pevne stanovenú násobnosť častíc N_d v skúmanej štruktúre. Každá nasledujúca N_d -tica častíc pozdĺž pseudorapiditnej osi jednotlivého prípadu zrážky sa môže považovať za skupinu charakterizovanú veľkosťou:

$$\Delta\eta = \eta_{max} - \eta_{min}, \quad (1)$$

kde η_{min} a η_{max} sú hodnoty pseudorapidít prvej a poslednej častice v skupine, hustotou:

$$\rho = \frac{N_d}{\Delta\eta} \quad (2)$$

a strednou pseudorapiditou (udáva polohou skupiny na pseudorapiditnej osi):

$$\eta_m = \frac{\sum \eta_i}{N_d}. \quad (3)$$

Táto metóda má výhodu v tom, že všetky skupiny majú z definície rovnakú násobnosť častíc N_d a môžu byť ľahko porovnávané navzájom i s modelovými výpočtami.

Na parametrizáciu azimutálnych štruktúr bol využitý parameter

$$S_2 = \sum (\Delta\phi_i)^2, \quad (4)$$

kde $\Delta\phi$ je rozdiel azimutálnych uhlov medzi dvoma susednými časticami v skupine. Kvôli jednoduchosti sa $\Delta\phi$ počíta v jednotkách priestorového uhla, a teda $\sum (\Delta\phi_i) \equiv 1$.

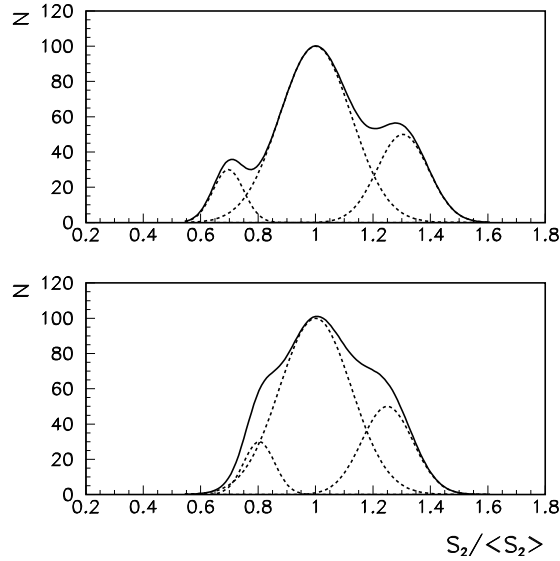
Parameter S_2 je veľký ($S_2 \rightarrow 1$) pre skupiny častíc s jet-like štruktúrou a malý ($S_2 \rightarrow 1/N_d$) pre skupiny častíc vytvárajúce prstencovú štruktúru. Očakávaná hodnota parametra S_2 v prípade čisto náhodnej produkcie s nezávislými časticami môže byť analyticky vyjadrená v tvare:

$$\langle S_2 \rangle = \frac{2}{N_d + 1}, \quad (5)$$

kde N_d je predvolený počet častíc v skupine. Tento výraz možno odvodiť z rozdelenia vzdialeností medzi azimutálnymi uhlami dvoch susedných častíc.

Vychádzajúc z vlastností parametra S_2 možno logicky predpokladať, že experimentálne rozdelenie pozostáva z troch častí:

- *Štatistická časť,*
- S_2 – *spektrum odpovedajúce prstencovým štruktúram,* ktoré sa v súhlase s vlastnosťami parametra S_2 nachádza v oblasti $S_2 < \langle S_2 \rangle$,
- S_2 – *spektrum odpovedajúce jetovým štruktúram,* ktoré je v oblasti $S_2 > \langle S_2 \rangle$.

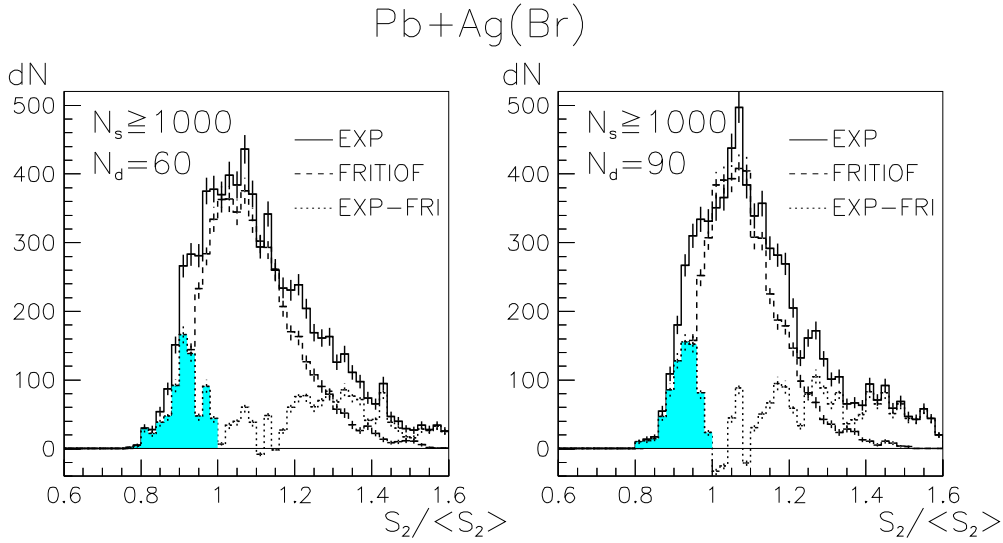


Obrázok 1: Príklad sumárneho $S_2/\langle S_2 \rangle$ rozdelenia od troch efektov: ring-like efekt + náhodná produkcia častíc + jet-like efekt.

Čo možno očakávať po vynesení experimentálneho S_2 rozdelenia? Kvôli jednoduchosti použijeme ďalej na vysvetlenie normovaný parameter $S_2/\langle S_2 \rangle$. Schématicky je to znázorené na *obrázku 1*, pričom sa pre jednoduchosť použilo Gaussovo rozdelenie. V prípade čisto náhodnej produkcie častíc bude mať rozdelenie pík okolo hodnoty 1. Prítomnosť jet-like štruktúr v interakcii spôsobí objavenie sa dodatočných píkov od tohto efektu, ale posunutých doľava vzhľadom na štatistické pozadie. Analogicky, prítomnosť prstencových štruktúr vyústí do objavenia sa dodatočných píkov na ľavej strane. Potom výsledné $S_2/\langle S_2 \rangle$ rozdelenie bude sumárnym rozdelením z týchto troch efektov a jeho tvar bude závisieť od veľkosti a polohy dodatočných píkov. Ak sa z experimentálneho $S_2/\langle S_2 \rangle$ spektra oddelí štatistické pozadie, tak zostane rozdelenie pozostávajúce z dvoch dobre odlišiteľných častí: od vkladu prstencových štruktúr v oblasti $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ a od vkladu jetových štruktúr v oblasti $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$.

4 Výsledky

V prvom kroku boli spočítané rozdelenia parametra S_2 (vzťah 4) pre rôzne násobnosti častíc v skupine N_d , keďže nie je známa najpravdepodobnejšia hodnota N_d charakteristická pre vznik týchto štruktúr v interakciách relativistických jadier. V texte používame namiesto parametra S_2 normovaný parameter $S_2/\langle S_2 \rangle$ kvôli ľahšiemu porovnaniu rozdelení s rôznymi násobnosťami N_d . Zároveň sa tým pík štatistického pozadia presunie pre všetky násobnosti N_d do hodnoty 1, čo uľahčí proces identifikácie prstencových štruktúr.

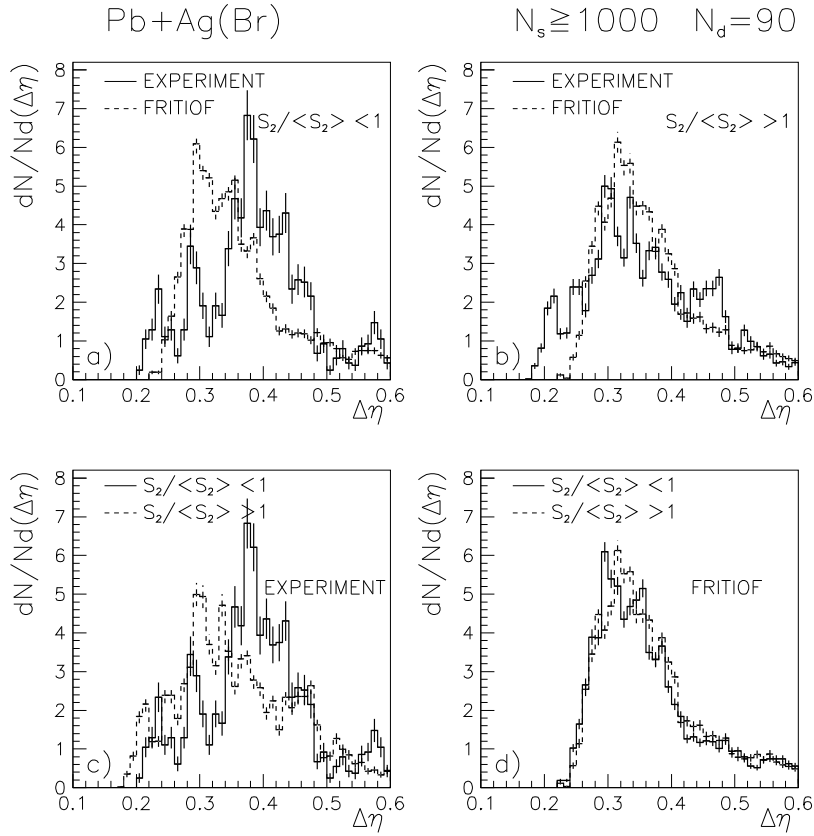


Obrázok 2: Experimentálne rozdelenie $S_2/\langle S_2 \rangle$ pre $N_s \geq 1000$ a dve násobnosti častíc $N_d = 60$ a $N_d = 90$ porovnané s modelom FRITIOF a výsledok po odčítaní modelového rozdelenia od experimentálneho.

4.1 Interakcie jadier olova s jadrami fotoemulzie

Z porovnania experimentálneho rozdelenia $S_2/\langle S_2 \rangle$ parametra s výpočtami generovanými podľa modelu FRITIOF (obrázok 2) možno usudzovať na prítomnosť efektu vzniku prstencových štruktúr. V ľavej časti experimentálneho rozdelenia sa nachádza často nie veľký pík, alebo jeho zbytok, ktorý v modelovom rozdelení chýba. Model FRITIOF však nezahŕňa ani efekty vzniku štruktúr typu jet-like a ani prstencových štruktúr, a preto boli rozdelenia generované podľa tohto modelu použité ako štatistické pozadie. V dolnej časti obrázka 2 sú výsledky získané po odčítaní štatistického pozadia z experimentálneho rozdelenia. Výsledné rozdelenie má dva veľmi dobre odlišiteľné časti, jednu v oblasti $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$, kde sa očakáva prejavenie efektu formovania prstencových štruktúr a druhú v oblasti jet-like štruktúr, kde $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$. Pomer plochy odpovedajúcej výslednému rozdeleniu v oblasti prstencových štruktúr ku celkovej ploche experimentálneho rozdelenia umožňuje oceniť pravdepodobnosť sformovania prstencových štruktúr v interakciách relativistických jadier. Zo závislosti pravdepodobnosti vzniku prstencových štruktúr od počtu častíc v prstenci N_d možno odhadnúť, že približne 10 – 12% z celkového počtu centrálnych interakcií jadier olova ^{208}Pb s hybnosťou 158 GeV/c na nukleón s jadrami fotoemulzie prispieva k prípadom s neštatistickými prstencovými štruktúrami.

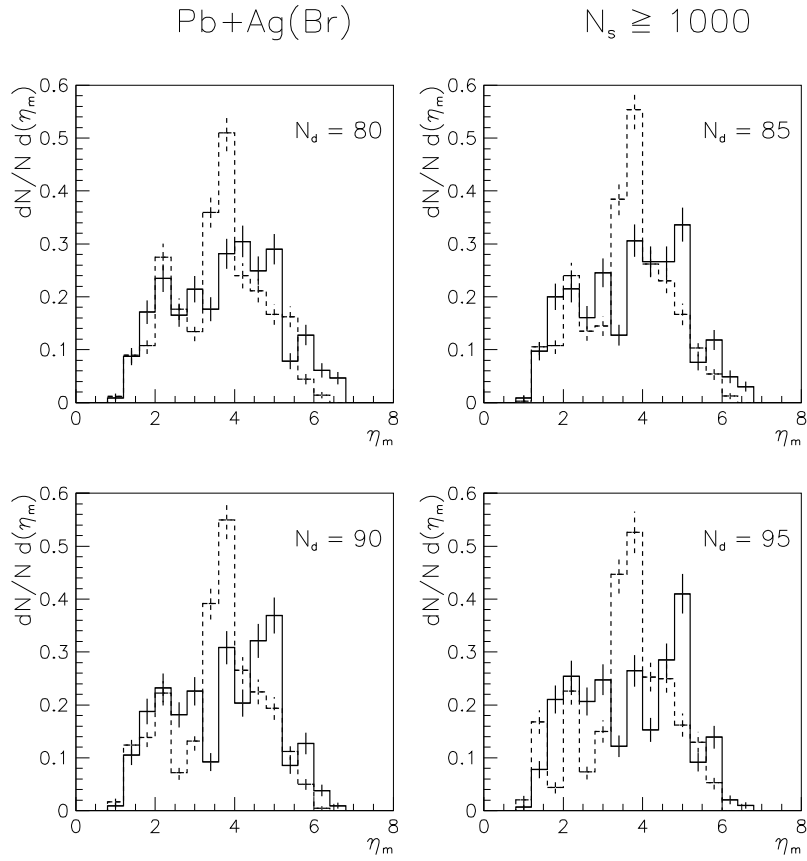
V ďalšom kroku sa skúmala veľkosť prstencovej štruktúry $\Delta\eta$ danej podľa vzťahu 1. Obrázok 3 predstavuje $\Delta\eta$ rozdelenie pre centrálné interakcie ($N_s \geq 1000$) s počtom častíc v skupine $N_d = 90$. Toto rozdelenie je zostrojené pre dve skupiny: $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ – oblasť



Obrázok 3: Experimentálne $\Delta\eta$ rozdelenie pre centrálné interakcie s $N_s \geq 1000$ a počtom častíc v prstenci $N_d = 90$ porovnané s modelovým rozdelením pre dve skupiny: $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ (oblasť prstencových štruktúr) a $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$ (oblasť jet-like štruktúr).

prstencových štruktúr a $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$ – oblasť jet-like štruktúr. Kvôli porovnaniu sú zároveň vynesené analogické rozdelenia získané z výpočtov podľa modelu FRITIOF. Možno si všimnúť, že sú tu rozdiely v tvare experimentálnych a modelových $\Delta\eta$ rozdelení v oboch oblastiach (obrázok 3a, 3b). Zároveň sa experimentálne $\Delta\eta$ rozdelenie pre oblasť prstencových štruktúr $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ líši ako v tvare, tak aj v hodnotách od prípadu s $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$ (obrázok 3c). No modelové rozdelenia pre obe skupiny $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ a $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$ sa navzájom výrazne nelíšia (obrázok 3d). V experimentálnom $\Delta\eta$ rozdelení pre oblasť prstencových štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle < 1$) sa objavili štyri píky pri hodnotách $\Delta\eta = 0,20-0,27$, $0,27-0,33$, $0,33-0,48$ a $0,48-0,60$. Podobný tvar $\Delta\eta$ rozdelenia sme očakávali v prípade, že sa pri formovaní uprednostňujú prstencové štruktúry len s určitými šírkami prstenca.

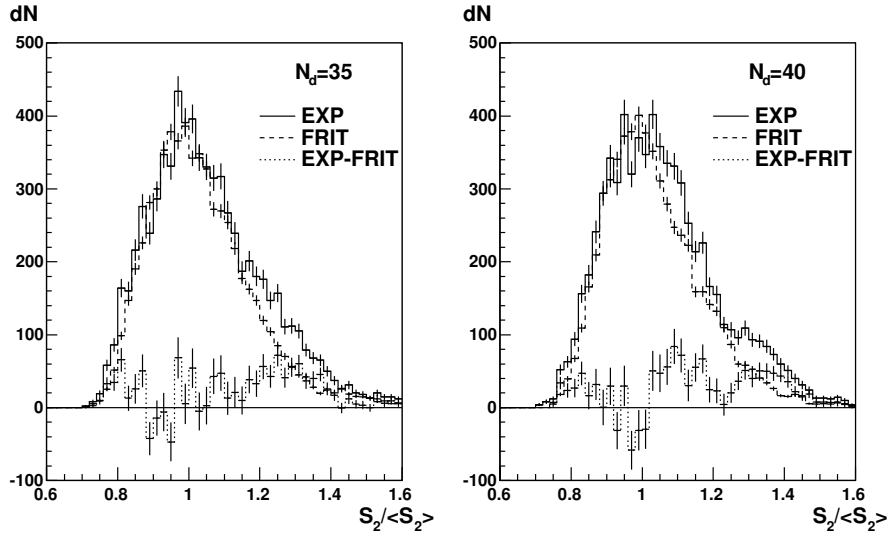
Poloha prstencovej štruktúry na pseudorapiditnej osi sa skúmala pomocou parametra η_m , ktorý je daný vzťahom 3. Parameter η_m sa študoval pre všetky tri centralitné triedy: $350 \leq N_s < 700$, $700 \leq N_s < 1000$ a $N_s \geq 1000$ v troch oblastiach: $S_2/\langle S_2 \rangle < 0,95$



Obrázok 4: Experimentálne rozdelenie η_m (plná čiara) pre centrálné interakcie s $N_s \geq 1000$ v oblasti prstencových štruktúr $S_2/\langle S_2 \rangle < 0,95$ pre rôzne násobnosti častíc N_d porovnané s modelom FRITIOF (čiarkovaná čiara).

– oblasť prstencových štruktúr, $S_2/\langle S_2 \rangle = 0,95 - 1,1$ – oblasť štatistického pozadia a $S_2/\langle S_2 \rangle > 1,1$ – oblasť jet-like štruktúr. Na *obrázku 4* sú vynesené experimentálne i modelové rozdelenia parametra η_m pre centrálné interakcie ($N_s \geq 1000$) jadier olova s jadrami fotoemulzie v oblasti $S_2/\langle S_2 \rangle < 0,95$ pre rôzne počty častíc v skupine $N_d = 80$ až $N_d = 95$. V strednej časti pri hodnote $\eta_m = 3,5$ má experimentálne rozdelenie minimum, kým modelové rozdelenie tam má maximum. Experimentálne rozdelenie sa takto rozdelilo na dve symetrické oblasti: $\eta_m = 1,6 - 3,2$ a $\eta_m = 3,6 - 5,2$.

Rozdiel medzi experimentálnymi údajmi a výpočtami podľa modelu FRITIOF v oblasti predpokladaného výskytu prstencových štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle < 0,95$) naznačuje existenciu dvoch η_m -oblastí preferovanej emisie prstencových štruktúr – jednu dopredu a druhú dozadu v CMS. V prípade vzniku prstencových štruktúr počas zrážky relativistických jadier podľa modelu koherentnej emisie gluónov [8] sa predpokladá, že sa objavia dva prstence formujúce dva kužele s rovnakými polárnymi uhlami v ťažiskovej sústave, jeden v pred-

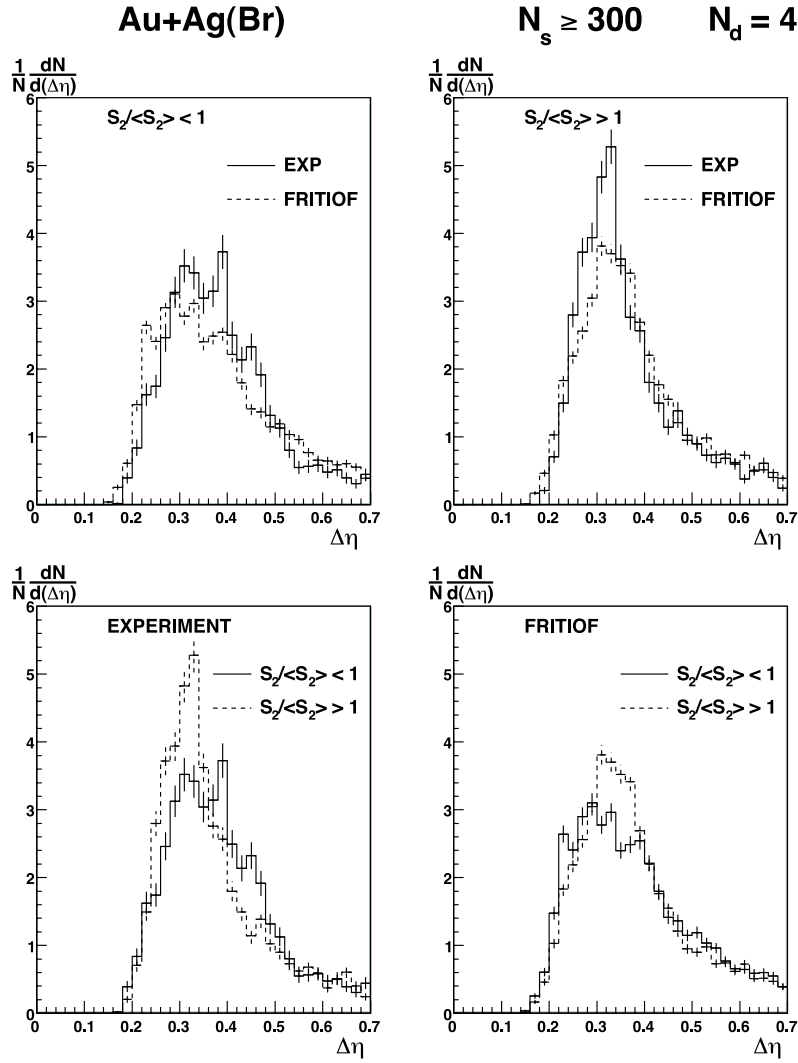


Obrázok 5: Experimentálne rozdelenie $S_2/\langle S_2 \rangle$ parametra pre dve násobnosti častíc N_d porovnané s výpočtami podľa modelu FRITIOF a výsledné rozdelenia získané po odčítaní modelového rozdelenia od experimentálneho.

nej a druhý v zadnej hemisfére [14]. Je známe, že uhol emisie čerenkovského žiarenia je priamo spätý s indexom lomu prostredia, v našom prípade s jadrovou hmotou. Toto by mohol byť jeden zo spôsobov ako zmerať index lomu jadrovej hmoty. Ten sa bude meniť v prípade fázového prechodu hadrónovej hmoty na kvarkovo-gluónovú plazmu.

4.2 Interakcie jadier zlata s jadrami fotoemulzie

Obrázok 5 predstavuje experimentálne rozdelenia $S_2/\langle S_2 \rangle$ parametra pre dve skúmané násobnosti častíc v skupine $N_d = 35$ a $N_d = 40$ v centrálnych zrážkach ($N_s \geq 300$) jadier zlata ^{197}Au s jadrami fotoemulzie porovnané s modelovými výpočtami. Analogicky, ako v prípade analýzy interakcií jadier olova s fotoemulziou, bol model FRITIOF použitý ako štatistické pozadie, pretože nezahŕňa efekty vzniku štruktúr jet-like ani prstencových štruktúr. Výsledné rozdelenia získané po odčítaní modelového rozdelenia od experimentálneho majú dve časti, jednu v oblasti očakávaného výskytu prstencových štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle < 1$) a druhú v oblasti jet-like štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle > 1$). Pravdepodobnosť vzniku prstencových štruktúr možno opäť oceniť z pomeru plochy odpovedajúcej výslednému rozdeleniu v oblasti $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ ku celkovej ploche experimentálneho rozdelenia. Z rozdelenia pravdepodobnosti vzniku prstencových štruktúr od N_d odhadujeme, že približne 2–5% z celkového počtu centrálnych interakcií jadier zlata ^{197}Au s hybnosťou 11,6 GeV/c na nukleón s jadrami fotoemulzie prispieva k prípadom s neštatistickými prstencovými štruktúrami.



Obrázok 6: Experimentálne $\Delta\eta$ rozdelenie pre centrálnu interakciu s $N_s \geq 300$ a počtom častíc v prstenci $N_d = 40$ porovnané s modelovým rozdelením pre dve skupiny: $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ (oblasť prstencových štruktúr) a $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$ (oblasť jet-like).

Obrázok 6 znázorňuje experimentálne $\Delta\eta$ rozdelenie pre centrálnu interakciu s počtom častíc v prstenci $N_d = 40$, ktoré je porovnané s modelovým rozdelením v oblasti prstencových štruktúr $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ a v oblasti jet-like štruktúr $S_2/\langle S_2 \rangle > 1$. Možno si všimnúť rozdiel v tvare experimentálnych a modelových rozdelení v oboch oblastiach. Rozdelenia $\Delta\eta$ získané z výpočtov podľa modelu FRITIOF pre obe oblasti sa v rámci stredných hodnôt navzájom nelíšia. V oblasti výskytu prstencových štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle < 1$) sa v experimentálnom $\Delta\eta$ rozdelení objavili tri píky pri hodnotách $\Delta\eta = 0,30-0,34$, $0,36-0,40$ a $0,44-0,48$. Prvý z týchto píkov je tiež prítomný v experimentálnom rozdelení pre oblasť jet-like štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle > 1$) ako aj v modelových rozdeleniach, a teda ho možno považovať za štatistický. Z hľadiska analýzy sú preto zaujímavé ďalšie dva píky.

4.3 Analýza jednotlivých prípadov

Posledná kapitola obsahuje výsledky štúdia prstencových štruktúr v jednotlivých prípadoch zrážok zvlášť, tzv. „Event by Event“. V prípade jadier olova ^{208}Pb sa analyzovali len centrálné zrážky s počtom relativistických častíc $N_s \geq 1\,000$. Toto multiplicitné kritérium splnilo 7 prípadov, čo predstavuje 1,1% z celkového počtu 628 prípadov interakcií jadier olova s jadrami fotoemulzie. V prípade interakcií jadier zlata ^{197}Au s fotoemulziou bolo na analýzu vybraných 24 centrálnych prípadov interakcií spĺňajúcich podmienku $N_s \geq 300$, čo predstavuje 2,0% z celkového počtu 1185 zmeraných prípadov zrážok.

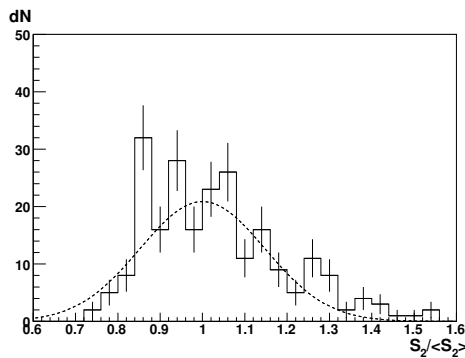
Pri analýze sme vychádzali z teórie vzniku prstencových štruktúr ako dôsledku emisie Čerenkovových gluónov. I. M. DREMIN interpretuje [9] túto myšlienku nasledovne: „Vysokoenergetické Čerenkovove gluóny môžu byť vyžiarené primárnym partónom pod malým polárnym uhlom v pokojovom systéme terčika. Každý gluón bude takto produkovať jet. Tieto jety by mali sformovať prstenec s jetovou subštruktúrou v azimutálnej rovine kolmej na smer pohybu primárneho partónu. Pri veľmi vysokých energiách môže byť počet Čerenkovových gluónov veľký a tieto môžu sformovať prstenec v jednotlivom prípade zrážky“.

Predpovedanou najdôležitejšou črtou takého procesu je kužeľ sekundárnych častíc pri určitom uhle vzhľadom na smer šírenia primárneho partónu. Ak sa z-ová os zvolí v tomto smere, potom by sa malo objaviť maximum v pseudorapiditnom rozdelení produkovaných sekundárnych častíc v danom prípade zrážky. Preto boli najprv detailne skúmané pseudorapiditné rozdelenia zvlášť u všetkých centrálnych prípadov zrážok.

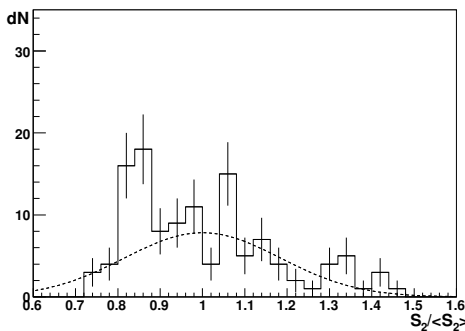
Selekciu zaujímavých prípadov sme robili tak, že na porovnanie s experimentálnou závislosťou sa použilo rozdelenie pseudorapidít spolu od všetkých centrálnych prípadov interakcií jadier s fotoemulziou, ktoré sa fitovalo gaussovým rozdelením. V pseudorapiditnom rozdelení experimentálnych dát sme potom na základe porovnania s fitovanými hodnotami hľadali štatisticky významné píky, pri ktorých bol rozdiel medzi experimentálnou a fitovanou hodnotou v maxime väčší ako 3σ .

Obrázok 7a),b) obsahuje rozdelenie parametra $S_2/\langle S_2 \rangle$ pre prípad zrážky jadier zlata ^{197}Au s jadrami fotoemulzie za podmienky, že veľkosť hľadanej prstencovej štruktúry $\Delta\eta < 0,3$. Pre daný prípad boli vybrané dve násobnosti N_d , pri ktorých sa prítomnosť tejto štruktúry najviac prejavila. Pri analýze sme sa sústredili na píky v oblasti odpovedajúcej prstencovým štruktúram, kde $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$. Možno si všimnúť, že v oboch rozdeleniach sa objavil pík pri hodnote $S_2/\langle S_2 \rangle \sim 0,85$. Táto interakcia je zaujímavá z hľadiska potlačenia jetových štruktúr v celom skúmanom rozsahu násobností N_d a výrazného prejavu sa prstencových štruktúr viacerými píkami v oblasti $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$.

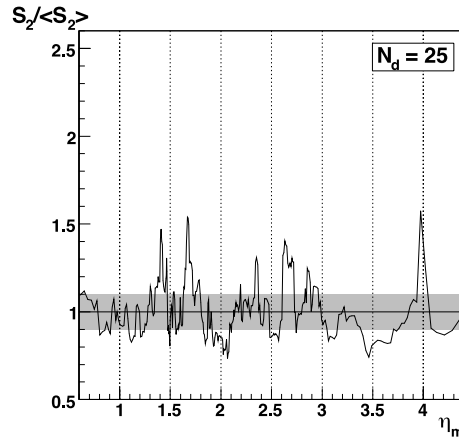
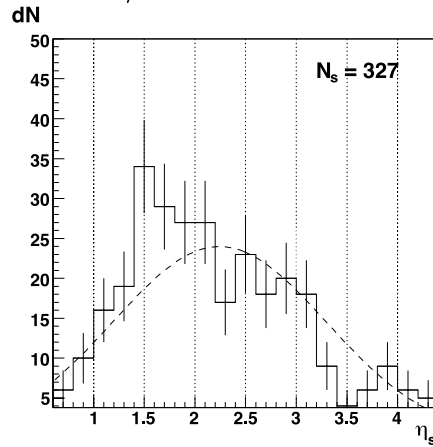
Prítomnosť prstencových štruktúr v konkrétnom prípade interakcie možno ešte lepšie preskúmať na rozdelení parametra $S_2/\langle S_2 \rangle$ v závislosti od η_m (obrázok 7c). Hodnota $S_2/\langle S_2 \rangle = 1$ na y-ovej osi na spodnom obrázku oddeľuje oblasť výskytu prstencových



(a) prípad č.23, $N_d = 25$



(b) prípad č.23, $N_d = 35$



(c) prípad č.23

Obrázok 7: a), b) Rozdelenie parametra $S_2/\langle S_2 \rangle$, ak je veľkosť štruktúry $\Delta\eta < 0,3$. Čiarkovaná čiara predstavuje fit štatistického pozadia gausovým rozdelením. c) Experimentálne rozdelenie pseudorapiditý η_s pre daný prípad (hore) a rozdelenie parametra $S_2/\langle S_2 \rangle$ v závislosti od η_m (dole). Sivý pás predstavuje štatistické pozadie.

štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle < 1$) od oblasti jet-like štruktúr ($S_2/\langle S_2 \rangle > 1$). Hodnoty parametra η_m na x-ovej osi zasa odpovedajú umiestneniu danej štruktúry na pseudorapiditnej osi. Pre ľahšiu orientáciu je na obrázku vynesené aj rozdelenie pseudorapiditý η_s (horný obrázok). Najprv sa hľadali výrazné píky v pseudorapiditnom rozdelení a potom na základe rozdelenia $S_2/\langle S_2 \rangle$ od η_m sa určilo, či tento pík odpovedá prstencovej štruktúre, alebo nie. V prípade interakcie č.23 sa maximum s násobnosťou častíc $N_d = 34$ pri hodnote $\eta_s = 1,4 - 1,6$ zhoduje so štatisticky významným píkom, ktorý možno priradiť k prstencovej štruktúre. Prítomné sú aj ďalšie prstencové štruktúry pri hodnotách $\eta_m = 1,8 - 2,2$ a $\eta_m = 2,5 - 2,6$.

Záver

V práci boli analyzované experimentálne údaje získané v rámci kolaborácie EMU01 z hľadiska možnej prítomnosti prstencových štruktúr v produkcii sekundárnych relativistických častíc v zrážkach jadier v emulznom detektore. Komplexne boli preštudované zrážky jadier olova ^{208}Pb s hybnosťou 158 GeV/c na nukleón a zrážky jadier zlata ^{197}Au s hybnosťou 11,6 GeV/c na nukleón pomocou parametra S_2 . Bola zvolená metóda s pevne stanovenou multiplicitou častíc v skúmanej štruktúre N_d . Tiež boli skúmané jednotlivé parametre prstencových štruktúr: veľkosť štruktúry v jednotkách pseudorapidity $\Delta\eta$, hustota častíc v štruktúre ρ a umiestnenie prstencovej štruktúry na pseudorapiditnej osi η_m v závislosti od centrality zrážky N_s a od násobnosti častíc v prstenci N_d .

Výsledky analýzy možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- V oboch experimentoch sa v rozdeleniach parametra $S_2/\langle S_2 \rangle$ objavili píky v oblasti $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$, ktoré poukazujú na prítomnosť prstencových štruktúr v centrálnych interakciách jadier olova ^{208}Pb a jadier zlata ^{197}Au vo fotoemulzii.

Z porovnania experimentálneho rozdelenia parametra $S_2/\langle S_2 \rangle$ s výpočtami podľa modelu FRITIOF možno tvrdiť, že efekt vzniku prstencových štruktúr v týchto experimentoch je prítomný.

Pravdepodobnosť vzniku prstencových štruktúr sa zvyšuje s rastom centrality a so zväčšovaním hybnosti nalietaujúcich jadier. Približne 10 – 12% z celkového počtu centrálnych interakcií jadier olova ^{208}Pb s hybnosťou 158 GeV/c na nukleón a 2 – 5% z celkového počtu centrálnych zrážok jadier zlata ^{197}Au s hybnosťou 11,6 GeV/c na nukleón s jadrami fotoemulzie prispieva k prípadom s neštatistickými prstencovými štruktúrami.

- Experimentálne rozdelenie parametra $\Delta\eta$ pre centrálnu interakciu sa v oblasti výskytu prstencových štruktúr líši od rozdelenia vypočítaného podľa modelu FRITIOF i od experimentálneho rozdelenia pre oblasť príslušiacu jetovým štruktúram. Tieto rozdiely boli pozorované pre všetky skúmané násobnosti N_d v oboch experimentoch.

Pri vyšších hodnotách počtu častíc, $N_d > 40$ pre zrážky jadier olova ^{208}Pb a $N_d > 30$ pre zrážky jadier zlata ^{197}Au , sa v experimentálnom rozdelení parametra $\Delta\eta$ objavilo niekoľko píkov. Z toho jeden aj pri hodnote, v ktorej má modelové rozdelenie lokálne minimum.

- V rozdelení parametra η_m bol v centrálnych interakciách v oboch experimentoch pre oblasť výskytu prstencových štruktúr pozorovaný rozdiel medzi experimentálnymi údajmi a výpočtami podľa modelu FRITIOF.

Experimentálne rozdelenie parametra η_m pre centrálné interakcie jadier olova ^{208}Pb sa v oblasti výskytu prstencových štruktúr $S_2/\langle S_2 \rangle < 0,95$ pri násobnostiach častíc $N_d = 65 - 100$ rozdelilo na dve symetrické oblasti. Toto správanie sa podporuje teóriu vzniku prstencových štruktúr podľa modelu koherentnej emisie gluónov, prejavujúcej sa vyžiarením dvoch prstencov, jedného smerom dopredu a druhého smerom dozadu v CMS.

- Z výsledkov analýzy jednotlivých prípadov interakcií jadier olova ^{208}Pb a jadier zlata ^{197}Au vo fotoemulzii možno skonštatovať prítomnosť ako jetových, tak aj prstencových štruktúr v skúmaných prípadoch zrážok.

Na základe kritérií použitých pri analýze možno potvrdiť prevahu prstencových štruktúr nad jetovými štruktúrami v jednom prípade interakcií jadier olova ^{208}Pb a v dvoch až štyroch prípadoch zrážok jadier zlata ^{197}Au zo všetkých skúmaných centrálnych prípadov interakcií.

V rozdelení parametra η_m , udávajúceho polohu prstencovej štruktúry na pseudo-rapiditnej osi, sa objavili dve maximá, rovnako vzdialené od stredu rozdelenia, pri hodnotách $\eta_m \approx 2,2 - 2,4$ a $\eta_m \approx 4,6 - 4,8$ pre zrážky jadier olova ^{208}Pb a pri hodnotách $\eta_m \approx 1,4 - 2,0$ a $\eta_m \approx 2,6 - 3,2$ pre zrážky jadier zlata ^{197}Au .

Uhol emisie prstencových štruktúr v pokojovom systéme terčika pre centrálnu interakciu jadier olova ^{208}Pb pri hybnosti $158 \text{ A GeV}/c$ možno odhadnúť na $\theta_{lab} = 0,7^\circ - 1^\circ$ a pre centrálnu zrážku jadier zlata ^{197}Au s hybnosťou $11,6 \text{ A GeV}/c$ na $\theta_{lab} = 5^\circ - 7^\circ$.

Metodické postupy aplikované pri analýze prstencových štruktúr v centrálnych zrážkach relativistických jadier v emulznom detektore možno využiť aj pri skúmaní údajov z experimentov s kozmickým žiarením a dát z elektronických experimentov. Do budúca sa plánuje previesť podobná analýza na údajoch z experimentu STAR a získané výsledky porovnať medzi sebou.

Výsledky analýzy zameranej na prítomnosť neštatistických prstencových štruktúr v centrálnych interakciách jadier olova ^{208}Pb s hybnosťou $158 \text{ A GeV}/c$ a jadier zlata ^{197}Au s hybnosťou $11,6 \text{ A GeV}/c$ vo fotoemulznom detektore boli prezentované na domácich a zahraničných konferenciách a publikované v zborníkoch z týchto konferencií (*Zoznam publikácií a citácií dizertantky*).

Referencie

- [1] A. V. APANASENKO et al.: Novaja interpretacija nekotorych „anomaľnych“ sobitij b kosmičeskich lučach, PISMA v ŽETF 30 (1979) 157.

- [2] I. M. DREMIN, A. M. ORLOV, M. I. TRETIAKOVA: Koľcevyje sobytija v adronnych processach pri vysokich energijach, PISMA v ŽETF 40 (1984) 320.
- [3] M. I. ADAMOVICH et al. (EMU01 Collaboration): On the jet-like and ring-like substructure in distributions of produced particles in central heavy-ion collisions at ultra-relativistic energies, J. Phys. G19 (1993) 2035.
- [4] A. EL-NAGHY, K. S. ABDEL-KHALEK: Observation of ring-like events in nucleus-nucleus interactions at 4.5 A GeV/c, Phys. Lett. B299 (1993) 370.
- [5] G. L. GOGIBERIDZE, L. K. GELOVANI, E. K. SARKISYAN: Study of multiparticle spikes in central 4.5 A GeV/c C-Cu collisions, Phys. Lett. B430 (1998) 368, hep-ph/9803268 (1998).
- [6] I. M. DREMIN: Kogerentnoje adronnoje izlučenie pri sverchvysokych energijach, PISMA v ŽETF 30 (1979) 152.
- [7] I. M. DREMIN: Vozmožnyje adronnyje analogi klassičeskovo izlučeniija elektrona, PISMA v ŽETF 34 (1981) 617.
- [8] I. M. DREMIN: Kogerentnoje roždenije adronov, Jadernaja Fizika 33 (1981) 1357.
- [9] I. M. DREMIN: Ring-like events: Cherenkov gluons or Mach waves?, hep-ph/0507167 (2005).
- [10] A. SH. GAITINOV et al. (EMU01 Collaboration): Interactions of $_{82}\text{Pb}^{208}$ -nuclei of energy of 158 GeV/nucleon with photoemulsion nuclei, Proceedings of XVII Meeting of the EMU01 Collaboration, Dubna, Russia, May 18–20 (1999) 143.
- [11] M. I. ADAMOVICH et al. (EMU01 Collaboration): Charged particle density distributions in Au induced interactions with emulsion nuclei at 10,7 A GeV, Phys. Lett. B352 (1995) 472.
- [12] E. STENLUND et al. (EMU01 Collaboration): Pseudorapidity distributions and azimuthal substructure in heavy ion and very heavy ion collisions at energies up to 200 A GeV, Proc. XXII. Int. Symp. on Multiplicity Dynamics, Spain, 13–17 July (1992).
- [13] V. V. UZHINSKII: Modified Code FRITIOF, User's guide, Preprint JINR E2–96–192 Dubna (1996).
- [14] G. I. ORLOVA et al.: Ring-like substructures in produced particles distributions in ^{197}Au induced interactions at 11.6 A GeV/c, Proc. of Conf. Hadron Structure 2002, Herľany (2002) 155.

Zoznam publikácií a citácií dizertantky

Práce, ktoré tvoria súčasť dizertačnej práce

1. S. Vokál, A. Vokálová, A. Kravčáková, S. Lehocká, G. I. Orlova
Peculiarities in produced particle emission in $^{208}\text{Pb}+\text{Ag}(\text{Br})$ interactions at 158 A GeV/c
Yad.Fiz. No. 6, Tom. 71 (2008)
Preprint E1-2004-173, Dubna, 2004, 10 pp.; e-Print: hep-ex/0412017

– I. M. Dremin
Ring-like events: Cerenkov gluons or mach waves?
Nucl. Phys. A767 (2006) 233-247; e-Print: hep-ph/0507167
2. S. Vokál, S. Lehocká, G. I. Orlova
Azimuthal Structures of Particles Produced in Heavy-Ion Interactions
Submitted to Yad.Fiz.
Preprint E1-2005-66, Dubna, 2005, 9 pp.; e-Print: hep-ex/0501025
3. S. Lehocká, S. Vokál, G. I. Orlova
Event by Event analysis of the ring-like substructures in the central interactions of heavy ion nuclei with photoemulsion
Proceedings of 15. Conference of Slovak and Czech Physicists, Slovak Academy of Sciences, Košice, 5. – 8. 9. 2005, (2005) 15-16
4. S. Vokál, S. Lehocká and G. I. Orlova
Dense groups of particles in high energy nuclear interactions of lead and gold nuclei in nuclear emulsions
Proceedings of the 8th International Workshop, Relativistic Nuclear Physics: From hundreds of MeV to TeV, Dubna, Russia, 23. – 28. 5. 2005, (2006) 194-202
5. S. Lehocká, G. I. Orlová, S. Vokál, A. Kravčáková
Emission of Relativistic Particles in Nuclear Interactions of Lead and Gold Nuclei with Photoemulsion
Zborník príspevkov 14. konferencie slovenských fyzikov, Smolenice, 2004, (2005) 23-24
6. S. Lehocká, S. Vokál, A. Kravčáková, G.I. Orlova
Štúdium prstencových štruktúr v centrálnych interakciách jadier olova pri 158 GeV/c na nukleón
Zborník príspevkov 13. konferencie slovenských fyzikov, Smolenice 2003, (2004) 171-172

Príspevky na konferenciách

1. Prednáška: *Event by Event analysis of the ring-like substructures in the central interactions of heavy ion nuclei with photoemulsion*
S. Lehocká, S. Vokál, G. I. Orlova, 15. Conference of Slovak and Czech Physicists, Slovak Academy of Sciences, Košice, 5. – 8. 9. 2005.
2. Prednáška: *Dense groups of particles in high energy nuclear interactions of lead and gold nuclei in nuclear emulsions*
S. Vokál, S. Lehocká and G. I. Orlova, Relativistic Nuclear Physics: From hundreds of MeV to TeV, 8th International Workshop, Dubna, Russia, 23. – 28. 5. 2005.
3. Prednáška: *Azimuthal Structures of Produced Particles in Heavy Ion Interactions*
S. Vokál, A. Kravčáková, S. Lehocká and **G. I. Orlova**, XII International Baldin Seminar on High Energy Problems, Dubna, Russia, 27. 9. – 2. 10. 2004.
4. Prednáška: *Peculiarities in Produced Particle Emission in $^{208}\text{Pb}+\text{Ag}(\text{Br})$ Interactions at $158\text{ A GeV}/c$*
S. Vokál, A. Vokálová, A. Kravčáková, S. Lehocká, G. I. Orlova, Hadron Structure 2004, Smolenice castle, Slovakia, 29. 8. – 3. 9. 2004.
5. Poster: *Investigation of the Ring-like Substructures in Central Interactions of ^{208}Pb Nuclei in Emulsion at $158\text{ A GeV}/c$*
S. Lehocká, G. I. Orlova, S. Vokál, A. Kravčáková, Phase Transition in Strongly Interacting Matter, Praha, Česká republika, 23. 8. – 29. 8. 2004.
6. Vystúpenie na odbornom seminári: *Study of the Ring-Like Substructures in ^{208}Pb Induced Interactions in Photoemulsion at $158\text{ A GeV}/c$*
S. Lehocká, S. Vokál, G. I. Orlova, Odborný seminár pracovnej skupiny J. A. Panebartzeva, LVE SÚJV, Dubna, Ruská Federácia, 25. 3. 2004.
7. Prednáška: *Emisia relativistických častíc v jadrových interakciách olova a zlata vo fotoemulzii*
S. Lehocká, G. I. Orlova, S. Vokál, A. Kravčáková, 14. konferencia slovenských fyzikov, Smolenice 2004.
8. Poster: *Štúdium prstencových štruktúr v centrálnych interakciách jadier olova pri $158\text{ GeV}/c$ na nukleón*
S. Lehocká, S. Vokál, A. Kravčáková, G. I. Orlova, 13. konferencia slovenských fyzikov, Smolenice 2003.

Summary

In this work the experimental data were analysed from the view of possible presence of the ring-like structures in production of secondary relativistic particles created in interactions of relativistic nuclei in photoemulsion detector. For the first time the individual nucleus-nucleus collisions with a ring-like substructure of produced particles in the azimuthal plane have been observed in cosmic ray experiments [1, 2] and later also in the accelerator experiments at high energy [3, 4, 5]. To explain observed peculiar substructures a new mechanism of multiparticle production at high energies was proposed in [6, 7]. This mechanism is similar to that of Cherenkov electromagnetic radiation. As a hadronic analogue, one may treat an impinging nucleus as a bunch of confined quarks each of which can emit gluons when traversing a target nucleus. I. M. Dremin [9] interprets this idea in following manner: “High energy Cherenkov gluons can be emitted by the primary impinging parton at small polar angles in the target rest system. Each gluon would produce a jet. These jets should form the ring with ‘jetty’ substructure in the azimuthal plane perpendicular to the direction of the primary parton. At very high energies the number of Cherenkov gluons can be large and they form a ring in a single event.”

The study of the parameter S_2 of subgroups of particles produced in interactions of lead nuclei ^{208}Pb with momenta 158 GeV/c per nucleon and interactions of gold nuclei ^{197}Au with momenta 11.6 GeV/c per nucleon in photoemulsion detector has been done. All used data have been obtained in the frame of EMU01 collaboration. The results of this analysis can be summarized as follows:

In both experiments in the distributions of $S_2/\langle S_2 \rangle$ parameter an additional peaks in the region of the ring-like structures $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ have been appeared and from the comparison with the FRITIOF model calculations we can say, that in these experiments the effect of formation the ring-like structures is present. The estimated contribution of the events with nonstatistical ring-like structures in the emission of produced particles is about 10 – 12% for Pb+Ag(Br) collisions and about 2 – 5% for Au+Ag(Br) collisions in the most central group.

The $\Delta\eta$ distribution, which gives the information about a ring-like structure size in pseudorapidity scale, for the experimental data in ring-like region ($S_2/\langle S_2 \rangle < 1$) differs from the model calculations and also from the experimental $\Delta\eta$ distribution for jet-like region ($S_2/\langle S_2 \rangle > 1$).

The difference with the FRITIOF model calculations in the η_m distributions in ring-like region $S_2/\langle S_2 \rangle < 1$ indicates to existence of two symmetrical η_m regions of preferred emission of ring-like structures: one in the forward and second in the backward direction in center-of-mass system.

This results are in good agreement with an idea that the ring-like structures have been appeared due to an effect of Cherenkov gluons, which is analogous to Cherenkov light.