

Analiza fenomena "ridge"-a u pp te Pb-Pb sudarima na ALICE eksperimentu

Martin Bajzek*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

(Dated: 26. siječnja, 2020)

Dvočestične korelacijske funkcije bitne su za proučavanje kompleksnih QCD sustava. *Ridge* korelacija je važna struktura koja se pojavljuje u visokoenergetskim sudarima čestica. Struktura je opažena u Pb-Pb, p-Pb te pp sudarima. Kvark-gluonska plazma bilo je moguće objašnjenje kod sudara teških iona, ali opažanja iz pp sudara kose se s predviđenim simulacijama. Dan je kratak teorijski pregled QCD-a i definicija korelacijske funkcije. Dani su su parametri važni za karakterizaciju korelacijske funkcije. Pomoću podataka s ALICE eksperimenta, osmišljena je kratka i brza metoda provjere postojanja "ridge"-a za generalnu klasu korelacijskih funkcija koje se pojavljuju.

I. TEORIJSKI UVOD

Kvantna kromodinamika (QCD) je teorija koja danas najpreciznije opisuje interakcije¹ kvarkova i gluona. Iako je teorija egzaktna, egzaktne je rezultate iznimno teško producirati. Jedan je problem relativno velika konstanta vezanja čime su brzi i efektivni računski perturbativne teorije nevaljani. Drugi je problem velik broj stupnjeva slobode zbog SU(3) podležće baždarne grupe. Osim tih, glavna su svojstva teorije

1. Zatočenje boje - činjenica da su kvarkovi vezani u bojno neutralne singlete. To ima za posljedicu postojanje nemogućnost opažanja slobodnog kvarka, koji nije vezan u hadron ili mezon.
2. Asimptotska sloboda - konstanta vezanja QCD-a pada s energetsom skalom.

Na niskim su energijama kvarkovi čvrsto vezani u hadrone. No, kako se povećava energija struktura postaje sve slabije vezana. Na visokim energijama se zbog asimptotske slobode pretpostavlja² da se sustav mnoštva kvarkova i gluona ponaša kao slabo-interagirajući plin. Takvo se stanje ekstemno visoke temperature i gustoće naziva kvark-gluonska plazma (QGP) te su kvarkovi i gluoni efektivno slobodni. Stanje QGP važno je za razumijevanje fizike vrlo ranog svemira do vremena od 1 ms. QGP je moguće proizvesti na velikim sudarivačima čestica poput Large Hadron Collider-a (LHC) na CERN-u ili RHIC-a na BNL-u (Brookhaven National Laboratory)³.

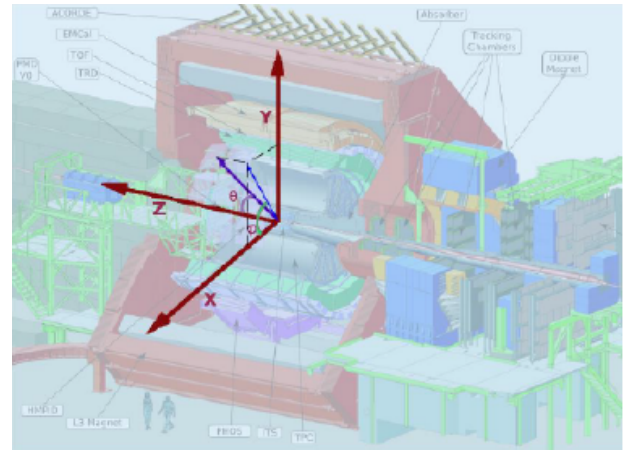
I.1. Sudari čestica

Pri ultrarelativističkim sudarima, na kratkoj se vremenskoj skali formira "vatrena kugla"² dovoljne temperature i malog radijusa za formiranje QGP-a. QGP, kao termodinamičko stanje, nakon otprilike 10^{-23} s ekspankira i hladi se do temperature ponovnog formiranja hadrona. Pošto je nemoguće direkto opažanje QGP-a, svojstva mu se, između ostalog, očituju iz kutnih korelacija³ proizvedenih čestica u izlaznom kanalu. Najzanimljivije su dugodosežne dvočestične korelacije za karakteriziranje interakcije. Mjerenja ALICE i CMS kolaboracija ukazuju⁵ na postojanje grebenastih struktura u takvim

dvočestičnim korelacijama. Te se strukture pripisuju interakcijama kvarkova i gluona unutar QGP prilikom sudara teških jezgara. Primjeri sudara koji se proučavaju su p-Pb te Pb-Pb. Međutim, slične strukture proizlaze i iz pp sudara⁴ visokih multipliciteta. Zanimljivo je to što se očekuje da je stvaranje QGP-a potisnuto za sudare lakih jezgara. Iz toga se pretpostavlja da se QGP može stvoriti u određenim uvjetima i kod lakših sustava.

I.2. Definicije opservabli

Pseudorapiditet čestice definiran je kao $\eta = -\ln \tan \theta/2$ gdje je θ kut između smjera projektila (z-osi) i vektora izlaznog impulsa čestice. Azimutalni kut definiran je između smjera impulsa i druge ortogonalne horizontalne osi. Osi kartezijevog sustava prikazane su na slici (1).



Slika 1: Definicije kutnih varijabli²

I.3. Korelacijska funkcija

Dvočestične korelacije promatraju se između razlike $(\Delta\eta, \Delta\phi)$. Takva je definicija Lorentz-invarijantna¹. Parovi $(\Delta\eta, \Delta\phi)$ se izračunavaju za svaki par izlaznih

čestica. Općenita korelacijska funkcija glasi

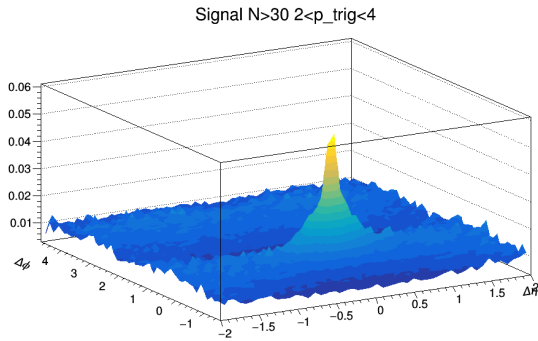
$$C(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{S(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B(\Delta\eta, \Delta\phi)} \quad (1)$$

Za bolji opis korelacija definiraju se *trigger* i *associated* čestice, gdje trigger² čestice imaju iznos transversalnog impulsa p_T u nekom zadanom intervalu. Associated su preostale. Unutar jednog događaja izračunava se $(\Delta\eta, \Delta\phi)$ za svaki par trigger i associated čestica. $S(\Delta\eta, \Delta\phi)$ predstavlja dvočestičnu raspodjelu među parovima unutar istog događaja. Pozadina $B(\Delta\eta, \Delta\phi)$ je analogno dobivena, ali za parove trigger i associated čestica između različitih, međusobno nezavisnih događaja. Njihova definicija tada glasi

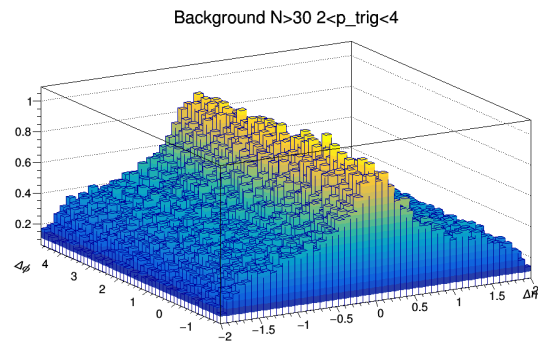
$$S(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N_{isti}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} \quad (2)$$

$$B(\Delta\eta, \Delta\phi) = \alpha \frac{d^2 N_{mjesani}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} \quad (3)$$

gdje se još $S(\Delta\eta, \Delta\phi)$ integrira po svim događajima, a $B(\Delta\eta, \Delta\phi)$ po svim parovima događaja. N_{trig} je ukupan zbroj trigger čestica u svim događajima. Konstanta α služi za normiranje vrha $B(\Delta\eta, \Delta\phi)$ na 1 nakon integracije po parovima događaja. Primjeri raspodjele signala i pozadine dani su na slikama (2) i (3).



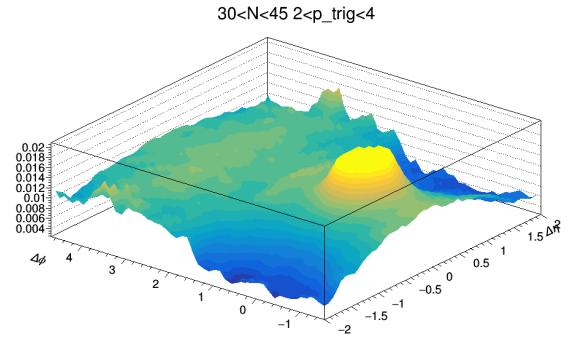
Slika 2: Primjer distribucije signala



Slika 3: Primjer distribucije pozadine

Multiplicitet N je broj utvrđenih trajektorija (i time čestica) u izlaznom kanalu pojedinog događaja.

Uobičajeni oblik korelacijske distribucije dan je na slici (4).



Slika 4: Dvočestična korelacijska funkcija $C(\Delta\eta, \Delta\phi)$

Uočljivo je da postoji oštar vrh na $(\Delta\eta, \Delta\phi) = (0, 0)$ koji je zbog preglednosti histograma izrezan. Taj je vrh prisutan zbog hadronizacije i stvaranja jetova (mnoštva čestica u gotovo istom smjeru). Grba na *far-side* $\Delta\phi = \pi$ prisutna je zbog očuvanja transversalne komponente impulsa. Strana $|\Delta\phi| < \pi/2$ naziva se *near-side*⁵ i generalno se ona proučava. Kod većih multipliciteta stvara se dugodosežna korelacija na $\Delta\phi = 0$ oblika grebena (*ridge*). Primjer takve distribucije dan je na slici (5). Razlog postojanja ridge-a naslučuje se da je kratko stvaranje⁶ QGP prilikom sudara. Pojava ridge-a je česta kod sudara teških iona i proizlazi iz simulacija. Ali moguće je isto ponašanje i kod sudara lakših jezgara koje nije predviđeno Monte Carlo simulacijama uz trenutno poznavanje svojstva QGP. Ridge efekt se pokušava i opisati modelom CGC-a (Color Glass Condensate)⁷. CGC je teoretsko stanje tvari koje prethodi QGP i očituje se da je distribucija impulsa čestica takva da je komponenta impulsa paralelna smjeru upadne čestice najveća. Time se objašnjava dominantna struktura na $\Delta\phi = 0$.

Osim multipliciteta N i raspona transversalnog impulsa p_T , bitna veličina za karakterizaciju je *ekscentricitet*⁵, e koji se definira kao omjer near-side RMS vrijednosti $\Delta\eta$ i $\Delta\phi$.

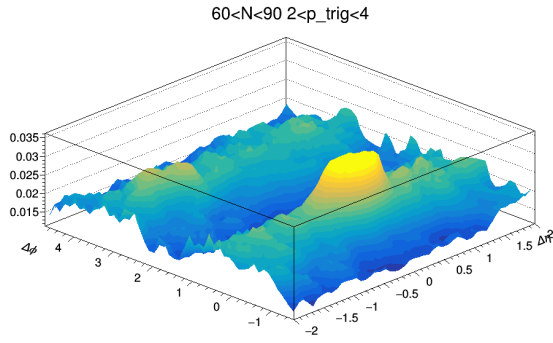
$$\sigma_\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta\eta^2}{N}} \quad (4)$$

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta\phi^2}{N}} \quad (5)$$

$$e = \frac{\sigma_\eta}{\sigma_\phi} \quad (6)$$

Relativno velik e potpis je 'proširenja' u $\Delta\eta$ smjeru i ukazuje na moguću prisutnost ridge-a.

Prisutstvo ridge-a u korelacijskim funkcijama se dosad određivalo ručno. U sljedećim poglavljima osmišljen je jednostavan algoritam kojim se određuje prisutstvo ridge-a.



Slika 5: Dvočestična korelacijska funkcija $C(\Delta\eta, \Delta\phi)$. Vidljiv je dodatni greben na $\Delta\phi = 0$

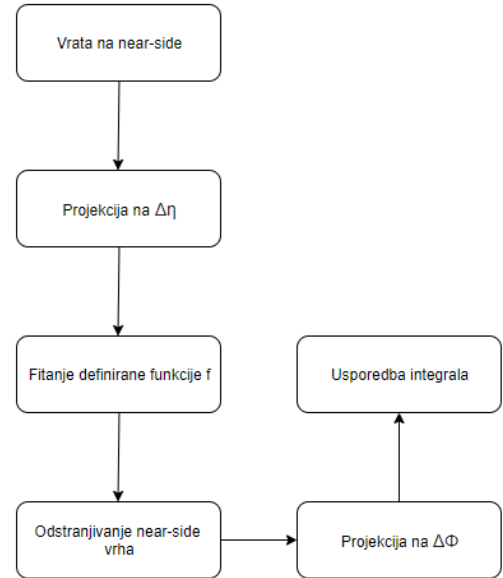
II. EKSPERIMENT

ALICE (A Large Ion Collider Experiment)⁸ je jedan od 8 detektorskih postava na LHC-u, koji je trenutno naj snažniji ubrzivač čestica sa maksimalnom energijom u centru mase od $\sqrt{s_{max}} = 13$ TeV. Pomoću ITS (Inner Tracking System) i TPC (Time Projection Chamber) detektora rekonstruiraju se putanje nabijenih čestice koje su korištene u analizi. ITS je sustav šest silicijskih detektora koji služi za identifikaciju kratkoživućih nabijenih čestica. Pokriva raspon⁵ pseudorapiditeta $|\eta| < 0.9$. Prva dva sloja su SPD (Silicon Pixel Detector) koji mogu rekonstruirati primarni i sekundarni verteks sudara unutar $100 \mu\text{m}$ rezolucije². TPC je plinska komora koja služi kao glavni detektor za praćenje putanje čestica. Nabijene čestice prolaskom kroz plin ioniziraju atome te efektom lavine elektroni u električnom polju dolaze na Multiwire Proportional Counter instrumente⁸. Pulsni signal proporcionalan je jačini ionizacije. Time se može odrediti točan položaj prolaska čestice. Poznavajući trajektoriju čestice u magnetskom polju, moguća je njena identifikacija preko q/m omjera. Time se također određuje i impuls. TPC ima sposobnost praćenja događaja velikog multipliciteta i time je pogodan za ALICE eksperiment. Za sustav okidanja služe V0 detektori (V0-A i V0-C) smješteni prije i poslije verteksa sudara te pokrivaju veće raspone pseudorapiditeta. V0 detektori daju informaciju o multiplicitetu događaja i centralnosti sudara. U analizi su korišteni podaci iz pp sudara pri energiji $\sqrt{s} = 7$ TeV.

III. REZULTATI

Za utvrđivanje postojanja ridge-a bitan je broj I koji se okvirno definira kao integral distribucije nakon oduzimanja dominantnog vrha. Na slici (6) opisan je algoritam utvrđivanja integrala.

Pošto je zanimljiva samo near-side, far-side se prvo isključuje vratima $|\Delta\phi| < \pi/2$ te se near-side projicira na $\Delta\eta$ -os histograma. Takva projekcija generalno pokazuje približno isto ponašanje. Postoji dominantni vrh na



Slika 6: Postupci prilikom određivanja integrala ridge-a

kojeg je superponirana otprilike konstantna distribucija. Prigodna funkcija za prilagodnu glasi

$$f(x) = p_0 + p_1 \exp\left(-\frac{(x - p_2)^2}{2p_3^2}\right) \quad (7)$$

Metodom najmanjih kvadrata dobivaju se parametri (p_0, p_1, p_2, p_3) . Stoga integral ridge-a otprilike iznosi

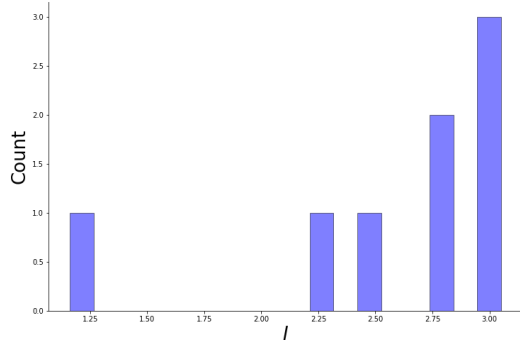
$$I \approx p_0(\max(\Delta\eta) - \min(\Delta\eta)) \quad (8)$$

Na temelju niza vrijednosti broja I ne može se pouzdano odrediti uvjet. Problem je što je maksimalna vrijednost vrha projekcije u rasponu $(0.1, 1)$. Općenito se ridge utvrđuje prema ocjeni omjera 'pozadinske' konstante i središnjeg vrha distribucije.

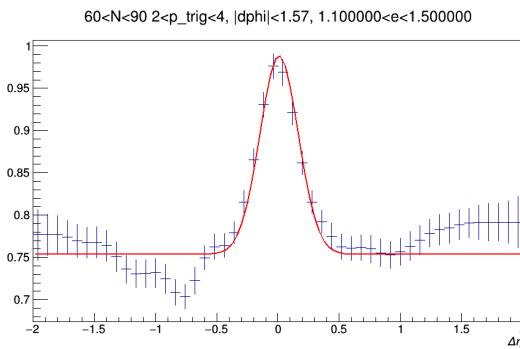
Stoga je prigodno da se projekcija normira na maksimalnu vrijednost 1. Uzeto je 8 različitih raspona multipliciteta i ekscentriciteta. Ručnim pregledom histograma uočava se da je za tri raspona ridge prisutan.

Za velike i male ekscentricitete i multiplicitete relativno je značajna razlika u integralu I te se slučajevi lako razlikuju. Kod velikih N , e , zanimljiva je pojava drugih grebenastih stuktura na rubovima $\Delta\eta = \pm 2$. Takve korelacije ukazuju na moguća raspršenja tri čestice⁹.

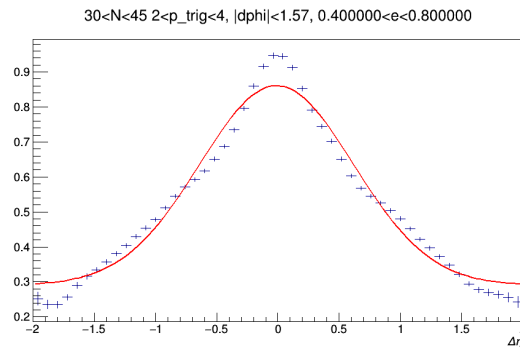
Srednje intervale N , e karakterizira uži vrh i stvaranje ridge-a, ali ne oko $\Delta\eta = \pm 2$. Time je izbor krivulje i sama definicija integrala nezgrapna. Usprkos tome, integral ridge-a dobro je procijenjen. Pošto sama pojava ridge-a nije jasno definirana, u ovom slučaju niti ne postoji konsenzus oko pojavljivanja grebena.



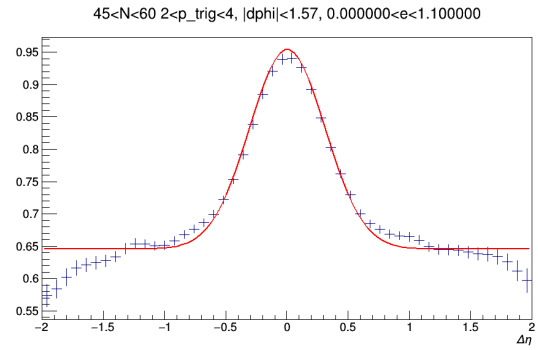
Slika 7: Distribucija (normiranih) integrala ridge-a



Slika 8: Projekcija za velike N , e . $I = 3.02$



Slika 9: Projekcija za male N , e . $I = 1.16$



Slika 10: Projekcija za srednje N , e . $I = 2.58$

Zaključuje se da postupak dobro razlikuje korelacijske funkcije s jasnim ridge-om od onih bez ridge-a. Problem nastaje na prijelazu slučajeva te se ovim postupkom loše definiraju uvjeti stvaranja ridge-a. Postupak se dakle može koristiti za utvrđivanje ridge-a i traženje negrebnaste strukture kod velikih multipliciteta i ekscentriciteta. Sama vrijednost integrala I nije od velike važnosti. Važnije je da se integrali svrstavaju u dva (donekle) odvojena raspona. Složeniji izbor funkcije $f(x)$ samo doprinosi dodatnim stupnjevima slobode i divergenciji regresije. Mogućnost malog poboljšanja procjene integrala bilo bi korištenjem Lorentzove distribucije umjesto Gaussove, ali ostaje isti problem opisa ruba distribucije. Rezultati metode procjene bili bi pouzdaniji uz veći broj podataka različitih korelacijskih raspodjela.

IV. ZAKLJUČAK

Opisana je teorijska pozadina visoko energetskih sudara čestica. Dan je opis stanja kvark-gluonske plazme i CGC-a. Dana je definicija dvočestične korelacijske funkcije koja služi kao glavni alat analize sudara čestica velikog multipliciteta. Opisane su značajke korelacijske funkcije i navedeni glavni parametri koji utječu na topološku pojavu grebena (ridge). Ukratko je opisan dio postava ALICE eksperimenta bitan za akviziciju potrebnih podataka. Pomoću podataka o pp sudarima s ALICE eksperimenta, osmišljena je metoda diskriminacije korelacijskih funkcija sa i bez grebena na $\Delta\phi = 0$. Osmišljen je postupak kojim se kvalitativno utvrđuje postojanje ridge-a u takvim dvočestičnim korelacijskim funkcijama.

* mbajzek.phy@pmf.hr

¹ Thomson M., Modern Particle Physics, Cambridge University Press, 2013

² Marko Jerčić, Reprodukcijska i izučavanje fenomena grebena ("ridge") u korelacijama dviju čestica na ALICE detektoru, *diplomski rad*

³ Toni Dunatov, Dvočestična ridge korelacija, *seminarski rad*

⁴ Li, W. Observation of a "Ridge" correlation structure in high multiplicity proton-proton collisions: A brief review, *Mod. Phys. Lett. A* 27.19, (2012)

⁵ Toni Dunatov, Usporedba grebnaste korelacije u sudarima protona i sudarima teških iona, *diplomski rad*

⁶ ALICE Collaboration: Multiplicity and transverse momentum evolution of charge-dependent correlations in pp, p-Pb

- i Pb-Pb collisions at the LHC *Phys. Lett. B.* 718 (2013)
- ⁷ A. Dumitru et al., Glasma flux tubes and the near side ridge phenomenon at RHIC, *Nucl. Phys.* A810 (2008)
- ⁸ Alice experiment, <http://alice.web.cern.ch/>
- ⁹ Perez Lezama, E., Paić, G., Cuautle Flores, E., Ortiz Velasquez, A. : Study of the PYTHIA $\Delta\eta\Delta\phi$ correlation as a function of multiplicity and transverse sphericity in proton-proton collisions at 7 TeV. //2015 *J. Phys.: Conf. Ser.* 578 01 (2015)