

Dvočestična “ridge” korelacija

Toni Dunatov

Fizički odsjek, PMF, Bijenička cesta 32, 10000 Zagreb

20. siječnja 2019.

Sažetak

Korelacijske funkcije su koristan alat za proučavanje složenih QCD sustava. “Ridge” korelacija je dosad nepotpuno objašnjena struktura koja nastaje rano u sudarima čestica i vjerojatno je vezana uz nastanak i svojstva kvark-gluonske plazme. Ova korelacija je dosad opažena u PbPb, pPb i pp sudarima za velike multiplicitete čestica. U seminaru je dan kratak uvod u teoriju te se na temelju podataka iz ALICE detektora dobivenih u pp sudarima pri $\sqrt{s} = 7$ TeV računaju korelacijske funkcije u kojima je moguće opaziti ridge, potom se repliciraju neki osnovni rezultati koji pokazuju ovisnost o multiplicitetu čestica.

1 Uvod

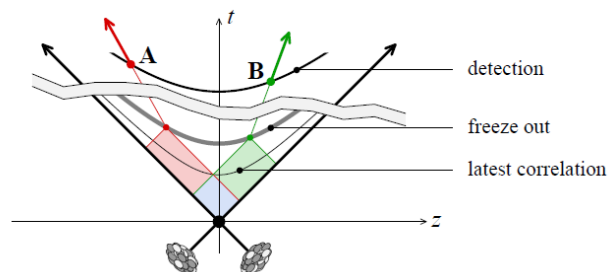
Iako je teorijska osnova kvantne kromodinamike (QCD) dobro poznata, u praksi je za mnoge fenomene i dalje teško dobiti točan kvantitativni opis. Glavni razlozi ovoga su neperturbativnost i velik broj stupnjeva slobode u sustavima koji nas zanimaju. Kvark-gluon plazma (QGP) je stanje koje se stvara na visokim temperaturama i gustoćama i pogotovo je zanimljivo za provjeru QCD modela, ali i za kozmologiju ranog svemira. QGP se zato intenzivno proučava sudarima teških iona na RHIC-u u Brookhavenu i LHC-u u CERN-u.

Ovakvi sudari u pravilu stvaraju veliki broj čestica u konačnom stanju, jedna od metoda analize je proučavanje prostornih korelacija između detektiranih čestica. Razlog za ovo je jednostavan, QGP, ili bilo kakvo slično stanje tvari, traje jako kratko, a iz specijalne relativnosti znamo da za dugodosežne korelacije postoji gornja granica vremena u kojem su nastale.

Relativistički argument je ilustriran na slici 1, dvije čestice mogu interagirati samo u vremenu u prošlosti u kojem se svjetlosni štosci sijeku. Preciznije se može dobiti da je gornja granica za vlastito vrijeme korelacije čestica [1]

$$\tau = \tau_{f.o.} \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta y\right) \quad (1)$$

ako je razlika u rapiditetu čestica Δy . Ovdje je freeze-out vrijeme $\tau_{f.o.}$ vlastito vrijeme u kojem se štosci sijeku, a y rapiditet čestica. Pretpostavka je da je pseudorapiditet $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ koji se mjeri u sudarivačima približno jednak y . U praksi su zanimljivi podaci na većim vrijednostima $\Delta\eta$, s obzirom da termalne korelacije idu do najviše $\Delta\eta \approx 1$.



Slika 1: Grafički prikaz korelacija u prostor-vremenu. Čestice mogu interagirati samo u preklapu crvenog i zelenog dijela. Preuzeto iz [2].

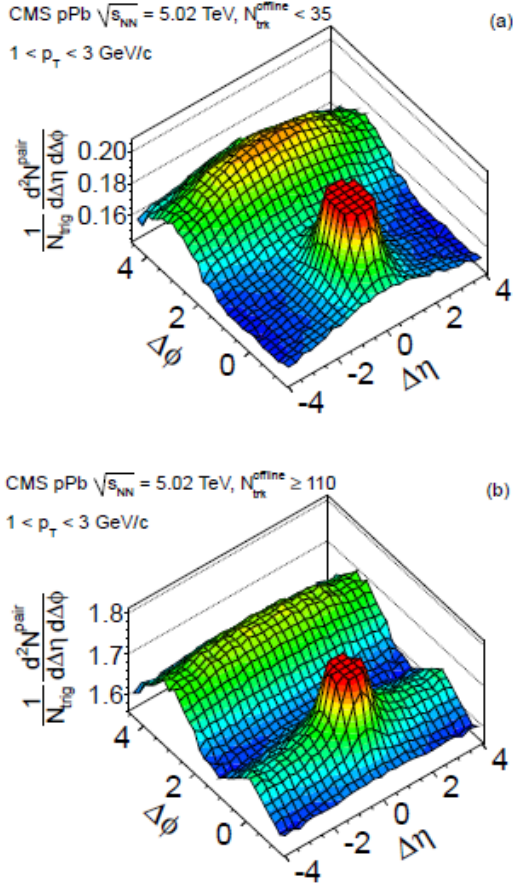
Korelacije se promatraju između parova čestica preko varijabli $(\Delta\eta, \Delta\phi)$, tj. mjere se relativne razlike u azimutalnom kutu i pseudorapiditetu. Rezultati se iskazuju preko tzv. korelacijske funkcije. Definicija korelacijske funkcije ovisi o eksperimentu ([3]- [6]), ali njen je općeniti oblik

$$R(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{S(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B(\Delta\eta, \Delta\phi)} \quad (2)$$

gdje $S(\Delta\eta, \Delta\phi)$ označava signal, a $B(\Delta\eta, \Delta\phi)$ pozadinu na koju se on normira. Ove veličine su detaljnije opisane u poglavlju 2. Treća relevantna varijabla u analizi je p_T , komponenta impulsa čestice okomita na snop akceleratora.

Među sudarima koji se proučavaju su Au-Au na RHIC-u, te pp, pPb i PbPb na CERN-u. Tipičan oblik korelacijske funkcije u ovakvim sudarima je dan na slici 2.a) preuzetoj s CMS eksperimenta [4]. U intervalu srednjih p_T od 1.0-3.0 GeV/c su vidljiva glavna svojstva: veliki vrh blizu $\Delta\phi \approx 0$ (*near-side*) koji je odrezan radi preglednosti i široka struktura s druge strane pri $\Delta\phi \approx \pi$ (*far-side*). Near side vrh je posljedica stvaranja jetova hadronizacijom, čiji su mehanizmi do-

bro poznati, a far side struktura se jednostavno može objasniti kao posljedica sačuvanja impulsa.



Slika 2: Podaci iz pPb sudara pri $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV za čestice s transverzalnim impulsom $1 < p_T < 3$ GeV/c. $N_{trk}^{offline}$ označava broj rekonstruiranih traka u analizi, slika a) odgovara događajima niskog multipliciteta, a b) visokog multipliciteta. U b) je vidljiv “ridge” na $\Delta\phi \approx 0$

Međutim, nedavno je pri sudarima teških iona u događajima visokog multipliciteta (broja čestica) otkrivena nova dugodosežna korelacija oblika grebena (*ridge*) koja nije predviđena Monte Carlo simulacijama. Ovo je vidljivo na slici 2.b), gdje se struktura blizu $\Delta\phi \approx 0$ se proteže u skoro cijelom intervalu rapiditeta i usko u kutu ϕ . Također, uz iste uvjete, ali za niski multiplicitet takav “ridge” nestaje. Slični podaci su dobiveni u ALICE [5] i ATLAS [6] eksperimentima. Ovo se moglo objasniti kao potpis QGP, no daljnjim istraživanjem je ista struktura dobivena i u pp sudarima u kojima se općenito smatra da nema stvaranja QGP, što dodatno komplicira problem. U ovom seminaru se promatraju upravo pp sudari i tražimo dokaze postojanja ridge korelacije.

2 Metode analize

2.1 Detekcija i selekcija događaja

U analizi su korišteni podaci prikupljeni pri pp sudarima u ALICE detektoru na CERN-u. Promatraju se samo nabijene čestice, jer je učinkovitost njihove detekcije veća. Za analizu su korištene putanje rekonstruirane u ITS (Inner tracking system) i TPC (Time projection chamber) detektorima.

ITS je sustav koji se sastoji od šest slojeva silicij-skih detektora različitih principa rada. On ima prihvata od $|\Delta\eta| = 0.9$ te služi za rekonstrukciju verteksa reakcije i putanja čestica. TPC je glavni detektor ALICE eksperimenta, radi na principu ionizacije plina i koristi Multi-Wire Proportional Counter (MWPC) instrumente za praćenje putanje čestica preko efekta lavine. TPC ima sposobnost rekonstrukcije putanja najblijenih čestica u 3 dimenzije unutar velikog volumena (≈ 88 m³). [10] Oba detektora su dizajnirana tako da bi bili sposobni detektirati događaje visokog multipliciteta, kakvi se pojavljuju u PbPb sudarima, u pp sudarima je gustoća čestica ipak bitno manja.

Uvjet za prihvata događaja je signal u V0M i V0A detektorima, koji pokrivaju veće udaljenosti u pseudorapiditetu, te primarni vrh interakcije unutar ± 10 cm od središta detektora u z -smjeru, tj. u smjeru snopa. Daljnji rezovi na kvalitetu rekonstruiranih putanja daju efikasnost od približno 80% unutar intervala koji se razmatra, dok za vrijednosti pseudorapiditeta $|\eta| > 1.2$, ona naglo pada. Nakon navedenih selekcija, uzorak sadrži $\approx 5.5 \cdot 10^6$ događaja. Analizirani sudari su se odvijali pri energiji sustava centra mase $\sqrt{s} = 7$ TeV.

2.2 Korelacijska funkcija

Nakon prikupljanja podataka i selekcije događaja, događaji se dijele u klase ovisno o multiplicitetu čestica u konačnom stanju. Potom se pomoću transveralnog impulsa p_T definiraju dvije vrste čestica: *trigger*, tj. okidač i *associated*, tj. pridružena čestica. Korelacije se promatraju između parova trigger i associated čestica u događaju, gdje triggeri imaju veći p_T .

Kao koordinantni sustav u kojem se funkcija mjeri se koriste varijable $\Delta\phi$ i $\Delta\eta$, koje su u ovom seminaru korištene u intervalima $-\pi/2 < \Delta\phi < 3\pi/2$ i $-2 < \Delta\eta < 2$. Ove su varijable korisne jer su invarijantne na relativističke transformacije. Trigger čestice su definirane uvjetom $2 < p_{T, trig} < 4$ GeV/c, a pridružene s $1 < p_{T, assoc} < 2$ GeV/c. Vrijednosti iz jed. (2) su definirane kao

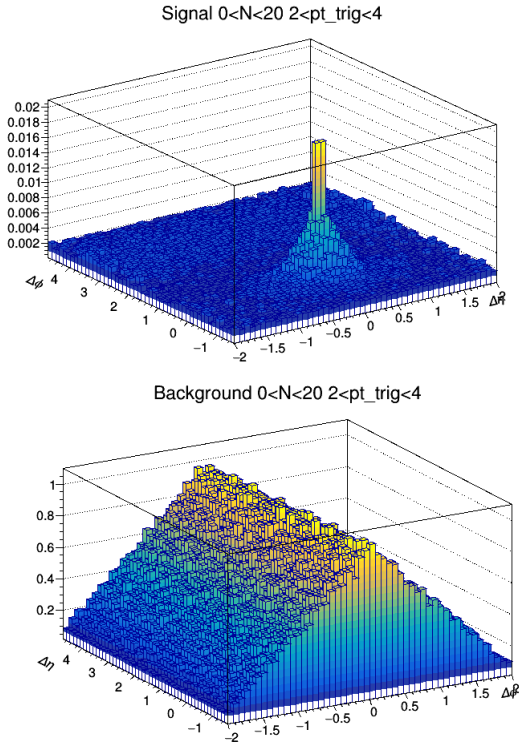
$$S(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N_{same}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} \quad (3)$$

$$B(\Delta\eta, \Delta\phi) = \alpha \frac{d^2 N_{mix}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} \quad (4)$$

Signal $S(\Delta\eta, \Delta\phi)$ je dobiven sparivanjem trigger i associated čestica iz istog događaja i dan je kao raspodjela parova po prostornom kutu normirana na ukupan broj

trigger čestica. Normiranje se vrši tek nakon obrade svih događaja, što znači da svaki par čestica ima jednaku težinu, neovisno o događaju iz kojeg je dobiven.

Pozadina $B(\Delta\eta, \Delta\phi)$ je dobivena slično kao i signal, jedina razlika je u tome da se čestice sparuju između različitih, nasumično odabranih događaja, između kojih nema korelacije. Ovakvom nasumičnom raspodjelom se radi korekcija na efikasnost detekcije parova koja ne mora nužno biti jednolika. Faktor α služi kao normiranje raspodjele tako da je njena maksimalna vrijednost 1. Primjer ovih raspodjela je dan na slici 3.



Slika 3: Primjer funkcija signala i pozadine za niski multiplicitet

U ovoj analizi pod izrazom multiplicitet se misli na broj rekonstruiranih putanja u događaju $N = N_{\text{trk}}$, postoje i neke druge varijable koje se mogu koristiti u ovu svrhu, ali njihove vrijednosti nisu značajno različite. Radi provjere ovisnosti o multiplicitetu događaji su podijeljeni u 5 različitih klasa koje su popisane u tablici 1. Za analizu je korišten programski paket ROOT.

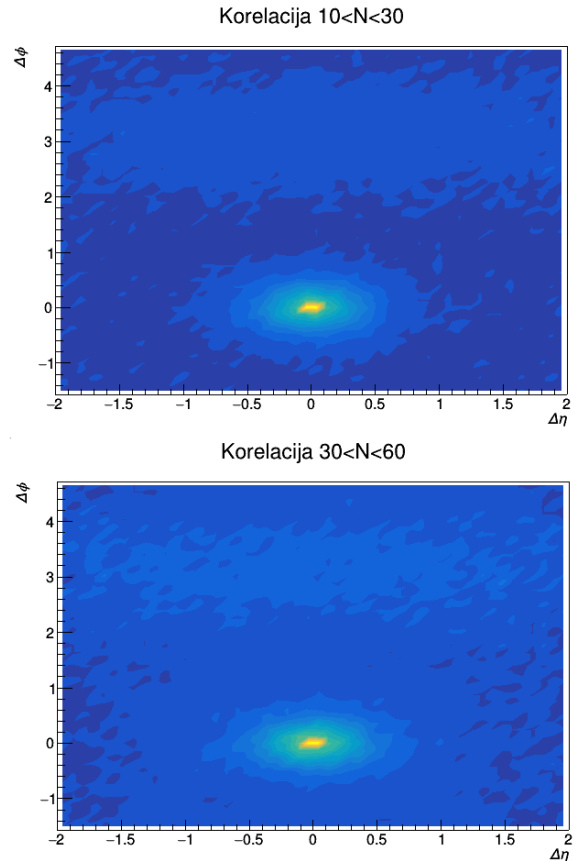
Selekcija	$\langle N_{\text{trk}} \rangle$	N_{trig}
$0 < N \leq 10$	4.742	$2.70 \cdot 10^5$
$10 < N \leq 30$	18.72	$1.26 \cdot 10^6$
$30 < N \leq 60$	40.63	$1.19 \cdot 10^6$
$60 < N \leq 90$	70.2	$2.85 \cdot 10^5$
$90 < N \leq 130$	101.1	$4.67 \cdot 10^4$

Tablica 1: Klase koje se razmatraju, zajedno sa srednjim brojem čestica i ukupnim brojem triggera.

3 Rezultati

Najveći problem analize je odvajanje ridge efekta od središnjeg vrha uzrokovanog jetovima, pogotovo ako uzmemo u obzir da je zbog ograničenja na prihvatanje čestica u $\Delta\eta$ teže dobiti dugodosežnu strukturu. Međutim, ipak je moguće vidjeti povećanje broja čestica blizu rubova raspodjele, na slici 5 su prikazane korelacijske funkcije za drugu i treću klasu događaja i očit je proširenje strukture na bliskoj strani. Sve korelacijske funkcije su prikazane u dodatku na kraju seminara.

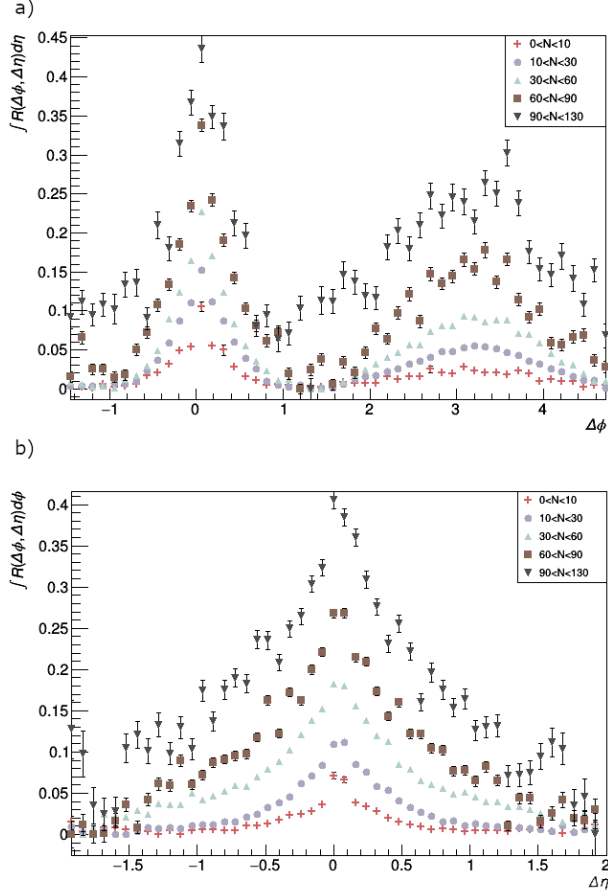
Da bi se jasnije prikazali ovi rezultati, korelacijske se funkcije mogu integrirati po $\Delta\phi$ ili $\Delta\eta$ čime se dobiju projekcije na osi. Kako se funkcije različitih multipliciteta jako razlikuju u ukupnoj vrijednosti koristi se tzv. ZYAM (Zero-yield-at-minimum) metoda, nakon integracije se od svakog histograma oduzme najmanja vrijednost, tako da je minimum jednak nuli, i promatraju se samo relativne razlike u iznosu funkcije. Pretpostavka je ovdje da doprinos zbog jetova nema znatnu ovisnost o multiplicitetu i da se ovime stoga dobro izolira struktura ridge-a. Dokazi iz poznatih analiza [5] podržavaju ovu aproksimaciju.



Slika 5: Korelacijska funkcija za a) $10 < N < 30$ i b) $30 < N < 60$, ove klase se uspoređuju jer imaju najbolju statistiku i sličan broj trigger čestica. Grafovi su prikazani bez ikakvih rezova na vrhu.

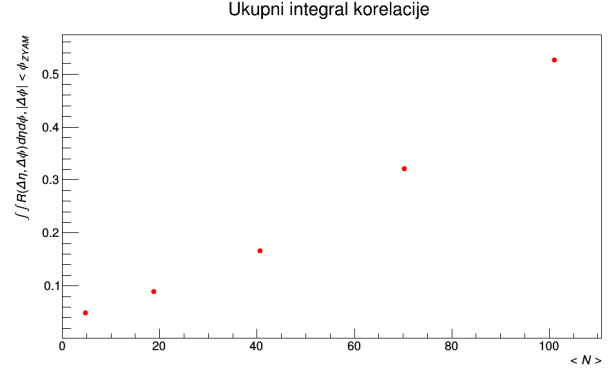
ZYAM metoda je primijenjena integracijom po cijelom prostoru prilikom projekcije na $\Delta\phi$, rezultati pri-

kazani na slici 6 pokazuju povećanje oba vrha i minimum oko $\Delta\phi \approx 1.2$. Kod projekcije na $\Delta\eta$ integrira se samo po bliskoj strani da bi se izolirao ridge i zaista je vidljivo da se distribucija na većim udaljenostima povećava, približno jednako kao i vrh $\Delta\eta = 0$. Iz ovoga se može zaključiti da je porast vrha u projekciji na $\Delta\phi$ većinom uzrokovan ridge efektom.



Slika 6: ZYAM projekcije korelacijskih funkcija na osi, integral u a) je napravljen po cijelom rasponu pseudorapiditeta, dok je pod b) on u granicama $-\pi/2 < \Delta\phi < \pi/2$. Prikazane su statističke greške, ali one su značajne samo za najveći multiplicitet, zbog malog broja događaja.

Konačno, moguće je procijeniti ukupan iznos ridge-a integriranjem po cijeloj bliskoj strani. Vrijednosti ovih integrala su izračunate integriranjem ZYAM projekcije na $|\Delta\eta|$ i prikazane su na slici 7, gdje se na x-osi nalaze srednje vrijednosti multipliciteta za svaku klasu. Poznati podaci ukazuju na to da je iznos ridge-a približno nula pri malim multiplicitetima i linearno raste poslije $N \approx 50$. [3][4] Dobiveni graf se slaže s ovim za visoke multiplicitete, ali postoji odstupanje za $N < 30$.



Slika 7: Ukupni iznosi integrala po $-\pi/2 < \Delta\phi < \pi/2$ i u cijelom rasponu $\Delta\eta$.

Zbog relativno male statistike je teško kvantitativno izmjeriti ridge fenomen, ali rezultati ukazuju na njegovo postojanje. Povećanje vrhova s porastom multipliciteta je većinom konzistentno s opažanjima ridge-a u literaturi. Greške prikazane su statističke i općenito nisu veoma velike, osim toga postoje i znatno veće sistemske greške koje ovise o selekciji događaja i konkretnoj metodi analize. One se ipak ovdje ne razmatraju jer bi takva diskusija bila puno opsežnija i za nju nema dovoljno podataka.

4 Zaključak

Analiziran je uzorak pp sudara i iz njega su dobivene korelacijske funkcije. U njima je opažena pojava ridge korelacije i eksplicitno je prikazana ovisnost o multiplicitetu nabijenih čestica u konačnom stanju. Rezultati se kvalitativno slažu s prijašnjim opažanjima, ipak direktna usporedba nije moguća zbog različitih načina detekcije događaja i analize podataka.

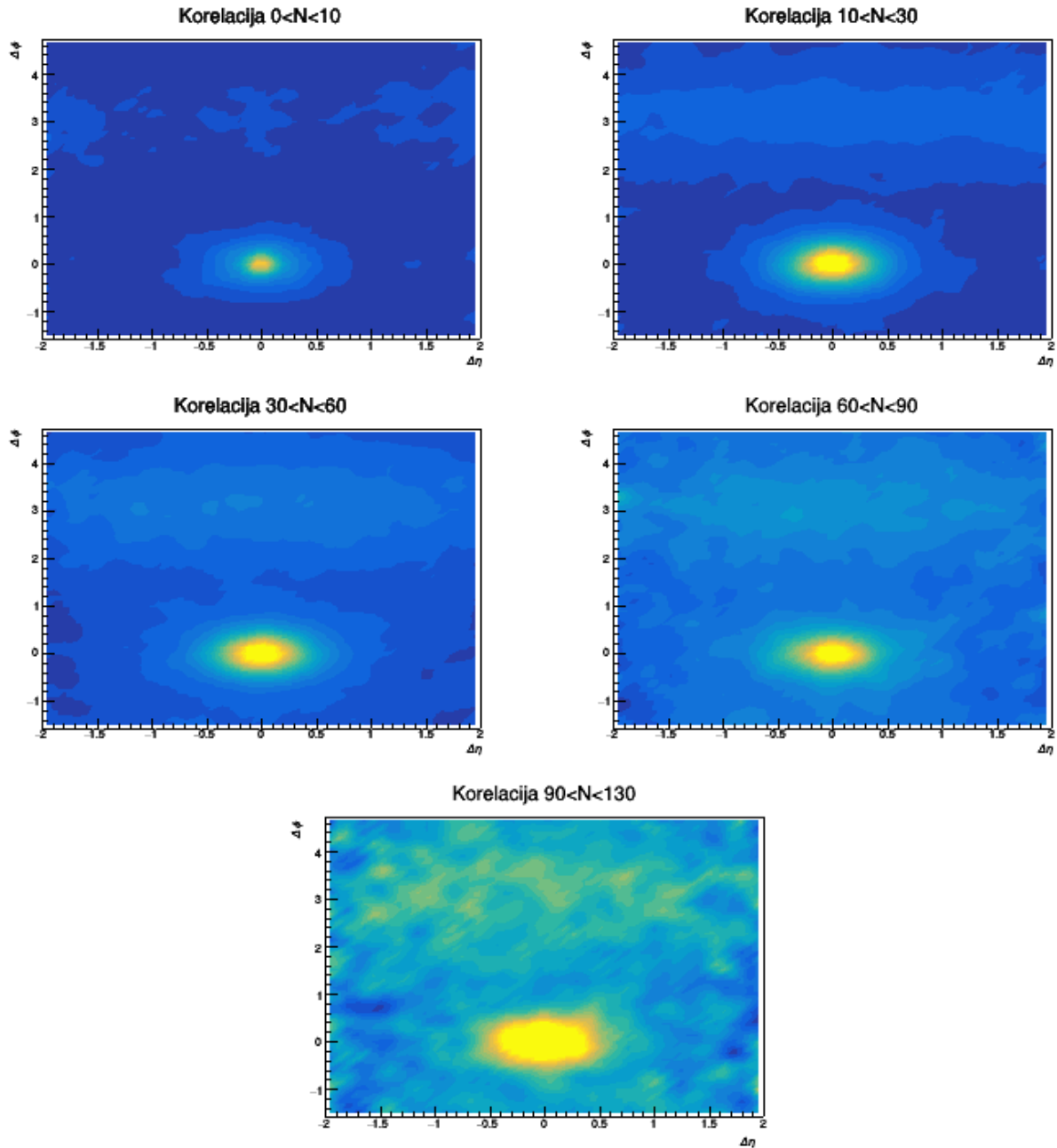
Postoji više teorijskih modela koji pokušavaju objasniti ovaj fenomen. QGP je gotovo savršen fluid i njena hidrodinamička svojstva su detaljno proučena, simulacije pokazuju da bi jedan uzrok ridge-a mogla biti hidrodinamička evolucija iz nehomogenih početnih uvjeta [7][9], međutim nema dokaza za stvaranje QGP u pp sudarima. Drugi model [1] koristi Color Glass Condensate (CGC) teoriju unutar koje se stvara Glasma, stanje materije koje prethodi QGP. Unutar Glasme gluoni interagiraju na način da distribucije imaju najveći doprinos za paralelne impulse, čime se dobije početna kolimacija u $\Delta\phi$ prije ikakve evolucije sustava.

Sofisticiraniji načini izoliranja ridge strukture i poboljšanje modela u simulacijama su potrebni da bi se sa sigurnošću mogao objasniti ovaj efekt.

Zahvale

Zahvalio bi se mentoru docentu Nikoli Poljaku na savjetima pri analizi podataka i izradi seminara te asistentu Filipu Erhardt u na pomoći oko koda.

Dodatak - Korelacijske funkcije



Slika 8: Sve korelacijske funkcije u konturnom prikazu. U ovom prikazu korištena je funkcija koja uglađuje krivulje radi smanjivanja statističkih fluktuacija. Također, vrhovi su odrezani na približno 50% maksimuma, kako bi se bolje mogli usporediti rezultati.

Literatura

- [1] A. Dumitru et al., The ridge in proton–proton collisions at the LHC, *Physics Letters B* 697.1 (2011)
- [2] A. Dumitru et al., Glasma flux tubes and the near side ridge phenomenon at RHIC, *Nucl. Phys.* A810 (2008)
- [3] CMS eksperiment, Measurement of long-range near-side two-particle angular correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, *Phys. Rev. Lett.* 116.17 (2016)
- [4] CMS eksperiment, Observation of long-range, near-side angular correlations in pPb collisions at the LHC, *Physics Letters B* 718.3, (2013)
- [5] ALICE eksperiment, Long-range angular correlations on the near and away side in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV *Physics Letters B* 719.1 (2016)
- [6] ATLAS eksperiment, Observation of Associated Near-side and Away-side Long-range Correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV Proton–lead Collisions with the ATLAS Detector, *Phys. Rev. Lett.* 110.18 (2013)
- [7] Wei Li, Observation of a "Ridge" correlation structure in high multiplicity proton-proton collisions: A brief review, *Modern Physics Letters A* 27.19 (2012)
- [8] ATLAS eksperiment, Observation of long-range elliptic azimuthal anisotropies in $\sqrt{s} = 13$ and 2.76 TeV pp collisions with the ATLAS detector, *Phys. Rev. Lett.* 116.17 (2016)
- [9] A. Ohlson, Ridges in p-A and pp collisions, arXiv:1901.00747 (2019)
- [10] Službena stranica ALICE eksperimenta: <http://alice.web.cern.ch/>