

Određivanje karakteristika događaja generiranih različito ugođenim kvantnodinamičkim simulatorom

Marko Husar

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nikola Poljak
*Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,
Sveučilište u Zagrebu, Bijenička c. 32, Zagreb
siječanj 2025.*

U okviru ovog rada proučava se utjecaj izbora ugađanja PYTHIA simulatora na svojstva izlaznih čestica u pp sudarima. Uspoređuju se distribucije transversalne količine gibanja p_T generiranih fotona pomoću tri različita izbora ugađanja simulatora. Analiza se vrši za sve izlazne fotone u pp sudarima na energiji od 100 GeV-a u sustavu centra impulsa te za fotone koji su nastali raspadima π^0 iz pp sudara na 100 GeV-a i 13 TeV-a u sustavu centra impulsa. Također, simulira se odaziv detektora za tri skupa podataka i uspoređuju se distribucije deponiranih energija fotona u njemu. U zaključku, ne postoje značajne statističke razlike među ugađanjima ukoliko u obzir uzimamo cijeli raspon vrijednosti simulirane varijable, ali postoje razlike za distribucije u području niskih vrijednosti transversalnog impulsa, tj. u necentralnom dijelu detektora.

I. UVOD

I.1. Simulator PYTHIA 8.3

PYTHIA je program za simuliranje visokoenergetskih sudara čestica koji sadrži rutine za modeliranje mnoštva fizikalnih aspekata, poput interakcija jakom silom (tzv. „hard and soft QCD interactions”), partonskih distribucija, fragmentacija, raspada čestica itd.¹ Riječ je o najčešće korištenom Monte Carlo generatoru događaja u fizici elementarnih čestica. U okviru ovog rada koristit ćemo inačicu programa PYTHIA 8.312 za simulaciju visokoenergetskih proton-proton sudara, u daljnjem tekstu pp sudara.

Postoje mnogi fizikalni procesi u sudarima hadrona koji se ne mogu izvesti iz prvih principa, npr. hadronizacija i multipartonske interakcije, oba procesa opisana neperturbativnom QCD fizikom. Iako se parametri u PYTHIA-i mogu mijenjati neovisno jedni o drugima, fizikalni zahtjev za smislenim skupom podataka uvodi korelacije i antikorelacije među parametrima simulatora. Stoga je potrebno provoditi ugađanja čitavih skupova podataka. Ta ugađanja (eng. *Tunes*) dolaze u pripremljenim paketima unutar programa i služe za simulaciju podataka koji odgovaraju rezultatima nekog eksperimenta. U ovom radu ćemo usporediti podatke dobivene pomoću tri različita *Tune*-a:

- *Tune 14*, poznat i kao „Monash 2013 tune”² predstavlja standard za izbor ugađanja u simuliranju proton-proton sudara, a podatci dobiveni uporabom ovog ugađanja odgovaraju eksperimentalnim nalaženjima u centralnim detektorima na CERN-u, primjerice na CMS detektoru,
- *Tune 05*, ugađanje pogodno za smanjenje udarnog presjeka za difrakcije, nastalo kako bi se reproducirali podatci dobiveni u ranoj fazi LHC-ovih mjerenja,

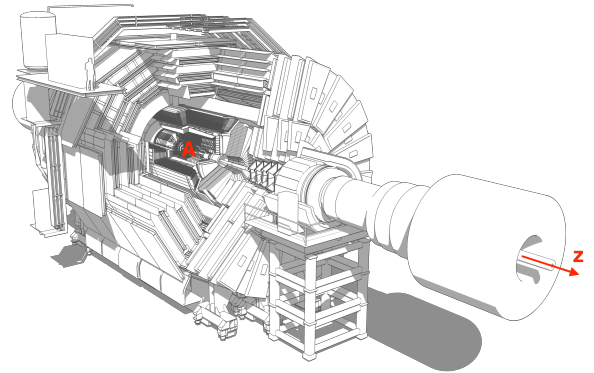
- *Tune 21*, poznat i kao „ATLAS A14 central tune” prilagođen podatcima iz centralnog dijela ATLAS eksperimenta na CERN-u.

I.2. Motivacija

Prvu usporedbu utjecaja ugađanja radimo za generirane distribucije transversalnih impulsa fotona koji nastaju kao produkti pp sudara. Transverzalni impuls fizikalna je veličina koja se često koristi u eksperimentalnoj fizici visokih energija, a definirana je kao

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (1)$$

u koordinatnom sustavu postavljenom tako da se z -os prostire linijom kojom, u nasuprotnim smjerovima, dovodimo protone koji interagiraju. Tu liniju često nazivamo linijom prostiranja detektora. Odabir ove veličine proizlazi iz činjenice da sva ugađanja dobro i slično opisuju procese u centralnom dijelu detektora. Shodno



Slika 1: Skica CMS detektora na CERN-u³

tome, najveće razlike u distribucijama očekujemo za tzv. *forward* čestice, izlazne čestice niskih vrijednosti parametra p_T .

Slika 1 prikazuje skicu CMS detektora na CERN-u. Na njoj je označena z -os, odnosno linija prostiranja snopa. U nasuprotnim smjerovima duž te linije dovodimo dva snopa protona koji se sudaraju u točki koja je na skici označena slovom A . Centralni dio detektora okružuje točku sudara i prostire se u x i y smjerovima te je za njega $z \approx 0$. U njemu su smješteni brojni poddetektori poput *pixel* detektora za praćenje trajektorija čestica, elektromagnetski i hadronski kalorimetri te CMS-ove mionske komore, ali i brojni drugi.

I.3. Normalizirani histogrami i pripadne greške

Za vizualizaciju distribucija koristimo se histogramima. Histogram konstruiramo tako da na apcisu postavimo mogući spektar vrijednosti neke varijable podijeljen u razrede (eng. *bins*), a na ordinatu učestalost pojavljivanja varijable unutar tog razreda. S obzirom na to da uspoređujemo različite skupove podataka, histograme ćemo normalizirati tako da suma relativnih frekvencija svih razreda bude egzaktno jednaka 1. Relativna razlika među distribucijama tada gubi ovisnost o razlici broja podataka među distribucijama.

Relativna frekvencija i -tog razreda definirana je kao $f_{r,i} = f_i/N$, pri čemu f_i označava apsolutnu učestalost, odnosno broj pojavljivanja varijable u i -tom razredu, a $N = \sum_{i=1}^{\xi} f_i$ ukupan broj podataka raspodijeljenih u ξ razreda. Statistička nepouzdanost (apsolutna greška) i -tog razreda Poissonovog je karaktera i ima iznos $f_i^{1/2}$, dok relativnu grešku računamo kao $f_i^{-1/2}$.

Grešku relativne frekvencije i -tog razreda dobivamo primjenom formule za greške ovisnih veličina

$$\sigma_{r,i} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\xi} \left(\frac{\partial f_{r,i}}{\partial f_k} \cdot \sigma_k \right)^2},$$

obraćajući pažnju da se zbog pojavljivanja veličine f_k u izrazu za N radi o složenoj derivaciji. Koristeći $\sigma_k = 1/\sqrt{f_k}$ dobiva se konačan rezultat

$$\sigma_{r,i} = \sqrt{\left(\frac{N - f_i}{N^2} \right)^2 \frac{1}{f_i} + \left(\frac{f_i}{N^2} \right)^2 \sum_{j \neq i} \frac{1}{f_j}}. \quad (2)$$

Primijetimo da relativna nepouzdanost svakog razreda utječe na grešku relativne frekvencije i -tog razreda.

Bitna veličina za usporedbu koju ćemo koristiti je p -vrijednost. Dvije distribucije smatramo značajno različitim za $p \leq 0.05$, odnosno identičnim za $p = 1.0$.

I.4. Statistički testovi za distribucije

Za usporedbu različitih distribucija koristit ćemo dva statistička testa, Kolmogorov-Smirnov i ANOVA, koje

ćemo ukratko opisati radi lakšeg razumijevanja dobivenih rezultata.

Kolmogorov-Smirnov test je neparametarski test jednakosti kontinuiranih ili diskretnih jednodimenzionalnih distribucija vjerojatnosti.⁴ Razlikujemo inačicu testa koji ispituje pripada li uzorak zadanoj referentnoj distribuciji, što nazivamo KS testom za jedan uzorak, i inačicu koja testira pripadaju li dva dana uzorka istoj distribuciji, poznatu kao KS test za dva uzorka. Očito ćemo za usporedbu distribucija koje su generirane pomoću različitih ugađanja koristiti verziju testa za dva uzorka. Ona je definirana u mnogim programskim jezicima, a mi ćemo koristiti funkciju *ks_2samp* iz paketa *SciPy*.

Rezultat KS testa je veličina D koja se naziva KS statistikom. Ona je za dvije empiričke funkcije distribucija X_α i X_β definirana kao

$$D_{\alpha,\beta} = \sup_x |X_\alpha(x) - X_\beta(x)|. \quad (3)$$

Intuitivno, KS statistika pronalazi najveću apsolutnu razliku dvije distribucije za sve vrijednosti varijable x o kojoj distribucije ovise.

ANOVA (eng. *Analysis of variance*) označuje skup statističkih modela za analizu razlika među uzorcima koji se oslanjaju na tzv. F-testove. F-test je bilo koji statistički test koji uspoređuje varijance dva uzorka. ANOVA koristi F-test usporedbom varijanci grupa uzimajući u obzir statistički šum podjelom po varijancama elemenata u grupi.⁵ Ovaj se test također može pronaći u programskom paketu *SciPy*, a odgovarajuća funkcija nosi naziv *f_oneway*.

Rezultat ANOVA testa je veličina poznata kao F statistika koja se uspoređuje s kritičnom vrijednosti $F_{crit.}$. Nul-hipotezu odbacujemo kada vrijedi $F \geq F_{crit.}$. Bez ulaženja u detalje izračuna ovih veličina, važno je napomenuti da za izračun kritične vrijednosti moramo poznavati broj stupnjeva slobode sustava. U našem slučaju imamo histograme s ξ razreda za koje je broj stupnjeva slobode $DoF = \xi - 2$. Dvojka u ovom izrazu dolazi od dva ograničenja sustava: zadanosti ukupnog broja podataka N i činjenice da histograme normaliziramo.

II. GENERIRANJE DISTRIBUCIJA TRANSVERZALNIH IMPULSA FOTONA

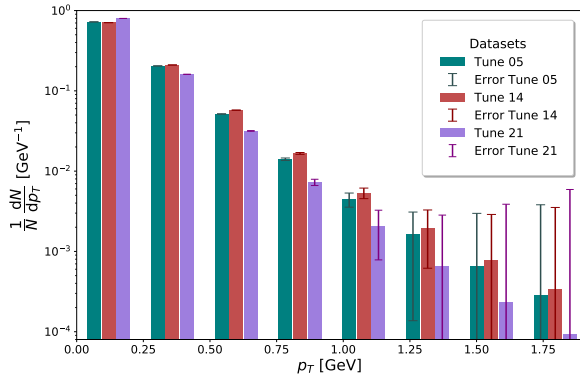
Promotrit ćemo distribucije transversalnih impulsa za sve fotone koji nastaju u pp sudaru s energijom $\sqrt{s} = 100$ GeV u referentnom sustavu centra impulsa, a zatim za fotone nastale raspadom π^0 mezona koji su i sami produkti pp sudara na energijama $\sqrt{s} = 100$ GeV te $\sqrt{s} = 13$ TeV.

U ovom trenutku valja napomenuti kako PYTHIA računa vrijednosti određenih fizikalnih veličina čestica iz teorijskih modela, a ne dobiva ih iz „mjerenja”. Za neke veličine koje se ne mogu izračunati PYTHIA koristi distribucije prilagođene tako da odgovaraju dosad prikupljenim podatcima na detektorima. Kada se kaže

da ugađanja slično opisuju procese u centralnom dijelu detektora, misli se na dio prostora gdje bi inače bio postavljen fizički detektor. Simulaciju detektorskog odaziva prikazat ćemo u poglavlju III gdje će jasnije biti opisana razlika između simulatorom generirane i detektirane vrijednosti zadanog parametra.

II.1. Fotoni nastali u pp sudarima na 100 GeV-a

Za početak promatramo sve fotone koji su izlazni produkti pp sudara na energiji $\sqrt{s} = 100$ GeV, neovisno o tome iz koje čestice majke fotoni potječu. Simulirano je $1.5 \cdot 10^7$ sudara u svakom ugađanju i od dobivenih podataka su stvoreni normalizirani histogrami prikazani na slici 2. Prikazani su podatci samo do određene vrijednosti p_T zbog toga što nas zanima područje u kojima bi se distribucije razlikovale. Pri višim vrijednostima p_T relativna razlika među distribucijama nalazi se unutar statističke greške pa zaključujemo da se u tom području distribucije ne razlikuju značajno. Greške prikazane na slici 2 predstavljaju standardne devijacije relativnih frekvencija u svakom razredu za koje smo pokazali da vrijedi jednakost (2).

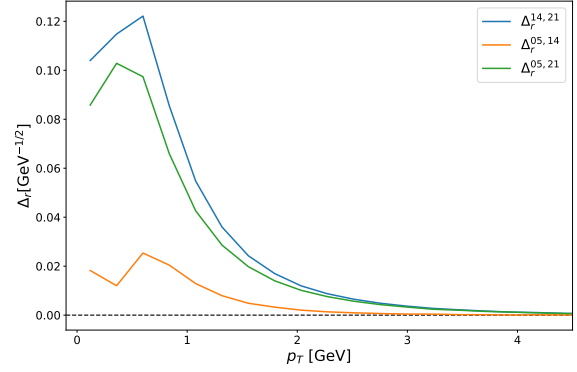


Slika 2: Normalizirani histogrami transverzalnih impulsa fotona nastalih u pp sudaru na energiji $\sqrt{s} = 100$ GeV

Slika 3 prikazuje relativne razlike između skupova podataka koji potječu iz simulacija s različitim odabirom ugađanja. Relativnu razliku i -tog razreda generiranog s ugađanjima a i b definiramo kao

$$\Delta_{r,i}^{a,b} = \frac{|f_{r,i}^a - f_{r,i}^b|}{\sqrt{(f_{r,i}^a + f_{r,i}^b)/2}}. \quad (4)$$

Standardno se relativna razlika dviju veličina definira kao omjer njihove razlike i njihovog prosjeka. U definiciji veličine Δ_r pojavljuje se korijen u nazivniku kako bismo pokazali koliko se relativne učestalosti razlikuju s obzirom na statističku grešku. To možemo napraviti sve



Slika 3: Relativne razlike između fotonskih p_T distribucija dobivenima različitim ugađanjima

dok su veličine za koje računamo ovakvu razliku bezdimenzionalne, kao u slučaju relativnih učestalosti pojavljivanja u razredima histograma. Iz relacije (4) jasno je kako se radi o diskretnoj varijabli. Povezivanje točaka na slici 3 služi isključivo za bolju vizualizaciju. Napominjemo kako ovako izračunata relativna razlika nije jednaka Kolmogorov-Smirnov statistici $D_{a,b}$ među distribucijama dobivenima ugađanjima a i b .

Sa slike 3 vidljivo je kako su najveće relativne razlike između podataka koji su dobiveni izborom ugađanja 14 i 21. Primjećujemo kako je pretpostavka da se distribucije najviše razlikuju u područjima niskih p_T vrijednosti valjana, dok se distribucije u području visokih p_T vrijednosti ne razlikuju značajno. Čestice s velikim vrijednostima parametra p_T nastaju u centralnom dijelu detektora, pa je razumno očekivati da izbor podešavanja ne utječe značajno na rezultat, zbog čega su razlike malene.

Kako bismo valjano usporedili ove distribucije, koristimo ranije opisane statističke testove. Rezultati Kolmogorov-Smirnov testa i ANOVA testa dani su u tablici I.

Tunes	D	p	$F / \cdot 10^{-15}$
05, 14	0.0370	1.0	0.08
05, 21	0.2222	0.5256	1.86
14, 21	0.2222	0.5256	2.72

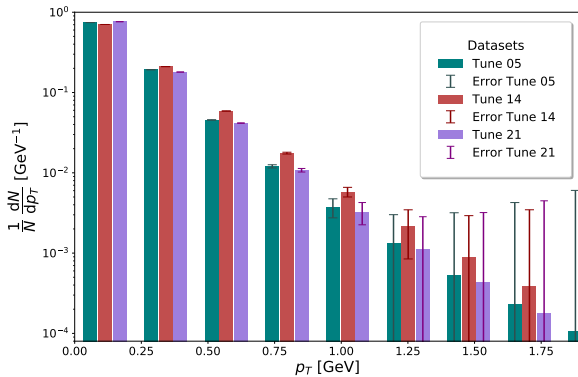
Tablica I: Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije prikazane na slici 2

Vrijednost $D_{05,14} = 0.0370$ govori kako je maksimalna razlika među distribucijama 05 i 14 za sve moguće vrijednosti parametra p_T jednaka 3.7%. Slično, $D_{05,21} = D_{14,21} = 0.2222$ ukazuje da je maksimalna razlika među distribucijama 05 (14) i 21 jednaka 22.22%. Kako su dobivene p -vrijednosti sve znatno veće od 0.05, zaključujemo da ne postoji statistička razlika među ugađanjima. Također, za sve F statistike vrijedi $F < F_{crit.}$, što dovodi do istog zaključka.

Testovi jasno pokazuju da ne postoji značajna statistička razlika među distribucijama transversalnih impulsa nastalih fotona. Naravno, oni uzimaju u obzir cijeli raspon dobivenih vrijednosti parametra p_T . Dobili smo opravdan rezultat s obzirom da područje razlikovanja distribucija (područje niskih p_T) predstavlja tek malen udio ukupnog raspona. Pokazali smo da se distribucije dobivene različitim ugađanjima mogu razlikovati do 22.22%, što je bitno za fine simulacije fotona s niskim p_T vrijednostima. Takve su simulacije potrebne za planiranje sve češćih eksperimenata u *forward* područjima.

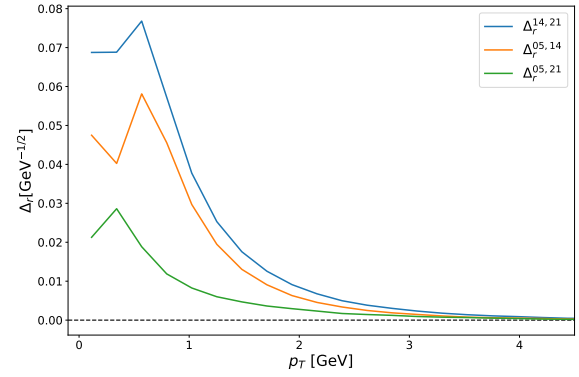
II.2. Fotoni iz raspada π^0 nastalih u pp sudarima na 100 GeV-a

U nastavku generiramo p_T distribucije fotona koji nastaju raspadima π^0 mezona iz pp sudara na energiji $\sqrt{s} = 100$ GeV. Odabir piona za česticu majku proizlazi iz činjenice da pioni u pp sudarima nastaju u području bliskom z -osi, tj. uz akceleratorSKU cijev. Neutralni pion ima srednje vrijeme života $\tau(\pi^0) = (8.43 \pm 0.13) \cdot 10^{-17}$ s, te se najčešće raspada na dva fotona (s omjerom grananja $BR(\pi^0 \rightarrow 2\gamma) = (98.823 \pm 0.034)\%$).⁶ Slika 4 prikazuje normalizirane histograme dobivenih p_T distribucija iz $1.5 \cdot 10^7$ pp sudara u svakom ugađanju sa standardnim devijacijama, a slika 5 relativne razlike među ugađanjima koje su dobivene primjenom formule (4). Povezivanje točaka na slici 5 ponovno služi radi bolje vizualizacije.



Slika 4: Normalizirani histograme p_T distribucija fotona iz raspada π^0 koji su nastali u pp sudarima na $\sqrt{s} = 100$ GeV

Ponovno zaključujemo kako su najveće relativne razlike između ugađanja u području niskih p_T vrijednosti. Iako grafovi na slikama 3 i 5 izgledaju slično, treba napomenuti kako su sada najmanje relativne razlike između podataka dobivenim ugađanjima 05 i 21, a ne više između ugađanja 05 i 14. Najveće relativne razlike su ponovno između distribucija s ugađanjima 14 i 21. Rezultati statističkih testova među distribucijama prikazani su u tablici II.



Slika 5: Relativne razlike p_T distribucija fotona nastalih raspadima neutralnih piona iz pp sudara na 100 GeV-a

Tunes	D	p	$F \cdot 10^{-15}$
05, 14	0.08	0.9999	1.18
05, 21	0.12	0.9955	1.67
14, 21	0.16	0.9149	5.73

Tablica II: Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije prikazane na slici 4

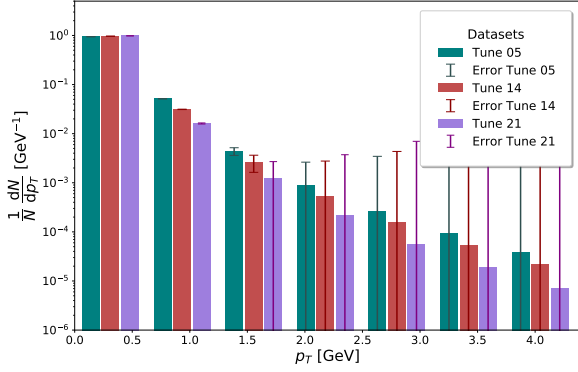
Kolmogorov-Smirnov statistike pokazuju kako je najmanja razlika između distribucija s ugađanjima 05 i 14, $D_{05,14} = 0.08$, a najveća među ugađanjima 14 i 21, $D_{14,21} = 0.16$. Ponovno zaključujemo da ne postoji statistički signifikantna razlika među distribucijama (sve p -vrijednosti su veće od praga 0.05 i za sve F statistike vrijedi $F < F_{crit.}$). U području niskih vrijednosti p_T distribucije se razlikuju do 16%.

II.3. Fotoni iz raspada π^0 nastalih u pp sudarima na 13 TeV-a

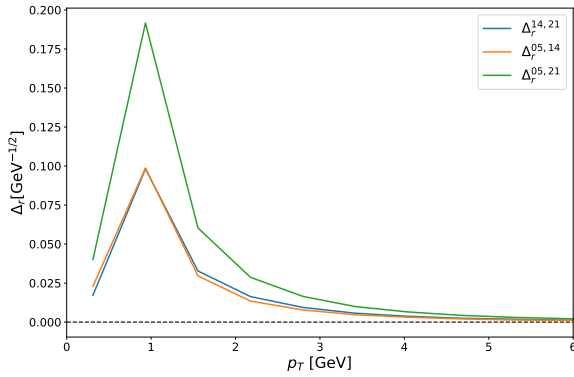
Konačno, usporedit ćemo p_T distribucije fotona iz raspada neutralnih piona koji su nastali iz pp sudara s energijom $\sqrt{s} = 13$ TeV, približavajući se tako trenutnim energijama sudara protona na LHC-u. Također, zanima nas kako zadavanje energije pp sudara utječe na relativne razlike u ugađanjima.

Slika 6 prikazuje normalizirane histograme p_T distribucija fotona iz $7.5 \cdot 10^6$ simulacija po ugađanju, a slika 7 njihove relativne razlike Δ_r povezane linijama radi lakše vizualizacije. Područje razlikovanja ugađanja je ponovno područje niskih vrijednosti transversalnih impulsa fotona. U tablici III dani su rezultati statističkih testova za distribucije prikazane na slici 6. Ponovno napominjemo kako su distribucije prikazane do određene vrijednosti parametra p_T u kojemu relativne razlike nadvladavaju statističke pogreške opisane izrazom (2).

Slika 7 ukazuje na ponovno drukčije ponašanje relativnih razlika među distribucijama. Najveće relativne



Slika 6: Normalizirani histogrami p_T distribucija fotona iz raspada π^0 koji su nastali u pp sudarima na $\sqrt{s} = 13$ TeV



Slika 7: Relativne razlike p_T distribucija fotona nastalih raspadima neutralnih piona iz pp sudara na 13 TeV-a

razlike u ovom primjeru su između p_T distribucija s ugađanjima 05 i 21. Prilikom generiranja p_T distribucija fotona koji su također nastali raspadima neutralnih piona iz pp sudara na nižim energijama u prošlom primjeru ova je razlika bila najmanja.

Tunes	D	p	$F \cdot 10^{-15}$
05, 14	0.1786	0.7732	2.52
05, 21	0.3571	0.0555	5.07
14, 21	0.25	0.3506	0.45

Tablica III: Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije prikazane na slici 6

KS statistika $D_{05,21} = 0.3571$ govori kako je maksimalna razlika među distribucijama s ugađanjima 05 i 21 jednaka 35.71%, što je najveća statistička razlika iznesena u ovom radu. Testovi i sada ukazuju da ne postoji značajna statistička razlika među distribucijama, uzimajući u obzir cijeli raspon dobivenih p_T vrijednosti fo-

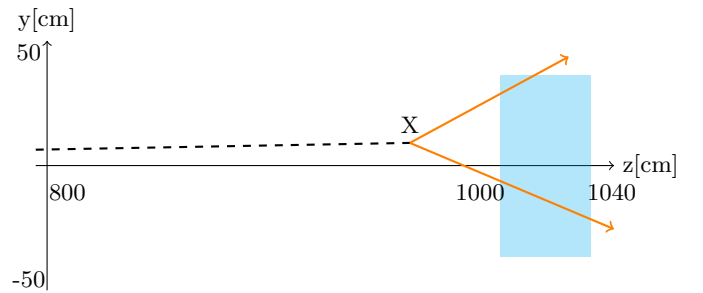
tona, iako se $p_{05,21} = 0.0555$ nalazi vrlo blizu opće prihvaćene granice za razlikovanje dviju distribucija.

Usporedba rezultata ovog i prethodnog primjera ukazuje da su razlike među ugađanjima osjetljive na promjenu energije pp sudara pa je za fine simulacije fotona u području niskih p_T vrijednosti potrebno detaljno analizirati razlike u ugađanjima zadajući vrijednost energije od interesa.

III. SIMULACIJA DETEKTORSKOG ODAZIVA NA FOTONE RAZLIČITO UGOĐENIH ENERGIJSKIH DISTRIBUCIJA

Do sada smo promatrali distribucije p_T vrijednosti nastalih fotona kao intrinzična svojstva tih čestica, tj. PYTHIA ih je računala iz teorijskih modela. Kako bismo provjerili možemo li opaziti razlike u distribucijama u eksperimentu generirat ćemo distribucije energija nastalih fotona te simulirati detektorski odaziv. Zatim ćemo promotriti energijske distribucije detektiranih fotona i analizirati njihove međusobne razlike.

Slika 8 shematski prikazuje simulirani detektorski postav. Ishodište koordinatnog sustava postavljamo u točku u kojoj sudaramo dva protona. Detektor koji simuliramo nalazi se 10 m niz detektorsku cijev (postavljenu na z -os) od točke sudara protona i zadajemo mu dimenzije $80 \times 80 \times 40$ cm. Kao primjer uzimamo elektromagnetski kalorimetar načinjen od natrijevog jodida. Iscrtkanom crnom linijom shematski prikazujemo sve čestice majke iz kojih kao produkt nastaju dva fotona. U točki X nastaju dva fotona prikazana narančastim linijama. Za svaki foton generiramo koordinate u kojima se stvara te njegov četveroimpuls $p^\mu = (E_0, p_x, p_y, p_z)$. Iz tih podataka rekonstruiramo putanje fotona te ukoliko oni u nekom dijelu svojih putanja prolaze kroz detektor zapisujemo njihove početne energijske distribucije i računamo prijedeni put u detektoru. Te podatke koristimo kao ulazne parametre u simulaciji detektorskog odaziva.



Slika 8: Shematski prikaz simuliranog detektorskog postava. Plavi pravokutnik reprezentira elektromagnetski kalorimetar.

Mehanizmi interakcije zračenja s materijom se bitno razlikuju za nabijene čestice i fotone. Glavne interakcije fotona u materiji su fotoelektrični učinak, Comptonovno raspršenje i produkcije parova.⁷ Ovi su procesi detaljno

proučavani i poznati su njihovi udarni presjeci. Ipak, u našoj analizi koristit ćemo se pojavom da se broj fotona u snopu, tj. njegov intenzitet smanjuje prolaskom kroz materijal, što nazivamo fotonskom atenuacijom. Za atenuaciju se može pokazati da ovisi eksponencijalno o debljini apsorbera x

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\mu x),$$

pri čemu $\mu = N_A \sigma / A$ označava maseni apsorpcijski koeficijent, a I_0 intenzitet snopa pri njegovom ulasku u materijal. Snop koji prolazi kroz materijal gubi energiju zbog smanjenja broja fotona. Standardni pristup u simulacijama s velikim brojem fotona je da modeliramo svaki snop kao jedan foton te primjenjujemo račun gubitka energije na pojedine fotone. Parametar μ ćemo preformulirati tako da iskoristimo standardnu poveznicu udarnog presjeka u materijalu s njegovom radijacijskom duljinom X_0 :

$$\sigma = \frac{7}{9} 4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}.$$

Konačno, možemo pisati da je energija fotona koja se preda materijalu po jedinici prijednog puta u materijalu x jednaka⁸

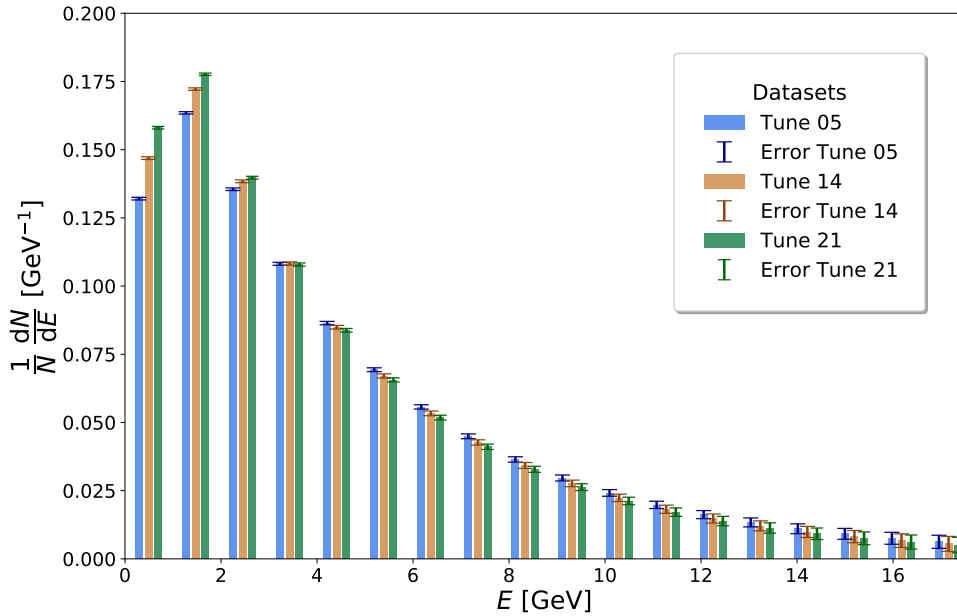
$$E(x) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{7}{9} \frac{x}{X_0}\right). \quad (5)$$

Materijal koji simuliramo je NaI(Tl), standardan odabir materijala za elektromagnetski kalorimetar u velikom broju eksperimenata. NaI(Tl) je scintilatorski anorganski kristal natrijevog jodida s ugrađenim aktivacijskim talijevskim nečistoćama. Iz tablica iščitavamo vrijednost radijacijske duljine u ovom scintilatoru⁹

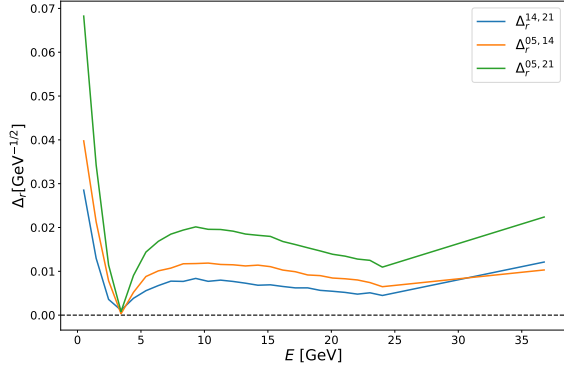
$$X_0(\text{NaI}) = 2.62 \text{ cm}.$$

Simulirat ćemo $4.95 \cdot 10^7$ pp sudara s energijama $\sqrt{s} = 100$ GeV te filtrirati sve fotone koji prolaze kroz detektor. Za njih zapisujemo početne energije te računamo koliki su put prešli u detektorskom materijalu, a zatim i deponiranu energiju primjenom izraza (5).

Slika 9 prikazuje normalizirane histograme distribucija deponiranih energija fotona u scintilatoru za tri izbora ugađanja simulatora za generiranje početnih energijskih distribucija. Primjenom izraza (4) možemo izračunati relativne razlike među ugađanjima, prikazane na slici 10. Na njoj je vidljivo kako relativne razlike među distribucijama padaju do neke vrijednosti u kojoj relativne razlike iščezavaju, a zatim ponovno rastu porastom deponirane energije. Najveće razlike su između distribucija s ugađanjima 05 i 21. Ovakav tip ponašanja nije bio vidljiv u ranijim analizama pa zaključujemo da on nastaje zbog efekata koji dolaze od prolaska fotona kroz detektorsku masu. Ponovno potvrđujemo pretpostavku kako se distribucije najviše razlikuju u području niskih energija jer niskoenergetski fotoni nastaju i uglavnom se gibaju uz detektorsku liniju.



Slika 9: Normalizirani histogrami deponiranih energijskih distribucija detektiranih fotona iz pp sudara na energiji centra impulsa $\sqrt{s} = 100$ GeV



Slika 10: Relativne razlike deponiranih energijskih distribucija dobivenih različitim ugađanjima

Konačno, za distribucije iz slike 9 možemo provesti statističke testove. Rezultati testova prikazani su u tablici IV. Vidljivo je da su najveće razlike među distribucijama dobivenima ugađanjima 05 i 14, odnosno 05 i 21 te da se one razlikuju do na 11.54%, tj. KS statistike iznose $D_{05,14} = D_{05,21} = 0.1154$. Za sve p -vrijednosti vrijedi $p > 0.05$ i za sve F statistike vrijedi $F < F_{crit.}$. Zaključujemo da ne postoji značajna statistička razlika među distribucijama, uzimajući u obzir čitavi raspon vrijednosti deponiranih energija.

Tunes	D	p	$F \cdot 10^{-31}$
05, 14	0.1154	0.9966	0.10
05, 21	0.1154	0.9966	1.20
14, 21	0.0769	0.9999	0.21

Tablica IV: Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije deponiranih energija u detektoru

Promotrimo sada distribucije deponiranih energija do energije koja uključuje prva tri razreda prikazana na slici 9. Vidimo da postoje jasne razlike među ugađanjima, što je bitno za fine simulacije detektorskog odaziva na prolaz niskoenergijskih fotona i moglo bi biti primjenjivo u razvoju *forward* detektora na kojima se trenutno radi.

IV. ZAKLJUČAK I DISKUSIJA

U okviru ovog rada, usporedili smo različite distribucije dobivene pomoću tri izbora ugađanja u PYTHIA simulatoru. Generirano je $8.7 \cdot 10^7$ visokoenergijskih pp sudara za svako ugađanje, odnosno ukupno $2.61 \cdot 10^8$ događaja. Za svaku promatranu distribuciju nacrtani su normalizirani histogrami s pripadnim greškama svakog razreda, izračunate su relativne razlike među distribucijama te su provedeni statistički testovi za usporedbu.

Promotrimo tri različita slučaja generiranih p_T distribucija fotona. U svim slučajevima smo ustvrdili da su najveće relativne razlike među distribucijama u području niskih p_T vrijednosti, sukladno početnoj pretpostavci. Čestice s velikim vrijednostima transverzalnih impulsa nastaju bliže centralnom području detektora pa izbor ugađanja nema velik utjecaj na izračun p_T vrijednosti, što je i pokazano.

Vidjeli smo da se najveće razlike među ugađanjima javljaju za distribucije generiranih fotona iz raspada π^0 mezona koje smo dobili iz pp sudara na energiji centra impulsa $\sqrt{s} = 13$ TeV. Uspoređujući s istim primjerom na energiji $\sqrt{s} = 100$ GeV možemo zaključiti kako su razlike među ugađanjima osjetljive na promjenu energije pp sudara. Također, ne možemo ni pretpostaviti koje razlike među distribucijama će biti najveće.

U svim analizama p_T distribucija fotona došli smo do zaključka da ne postoje signifikantne statističke razlike među njima. Ipak, valja napomenuti da su distribucije bile uspoređivane za cijeli raspon dobivenih p_T vrijednosti. Kako se područje razlikovanja distribucija nalazi u malenom dijelu ukupnog raspona vrijednosti transveralnog impulsa, zaključujemo da smo dobili valjan rezultat. Za ugađanja distribucija u području niskih p_T vrijednosti pokazali smo da postoje razlike koje su možebitne u razvoju *forward* detektora.

Za kraj smo simulirali detektorski odaziv na prolaz fotona s različito ugođenim energijskim distribucijama. Rezultati statističkih testova za distribucije deponiranih energija u elektromagnetskom kalorimetru pokazuju da ne postoje značajne statističke razlike među njima. Ponovno su distribucije bile uspoređivane u cijelom rasponu deponiranih energija. Ukoliko promotrimo spektar niskoenergijskih fotona možemo opaziti statističke razlike među distribucijama.

Rad bi se mogao dodatno unaprijediti povećanjem broja događaja što bi omogućilo finiju podjelu razreda u histogramima p_T distribucija. Simulacija odaziva detektora se može napraviti za više energije pp sudara te usporediti s danim primjerom, a planira se napraviti i finija simulacija depozicije energije u detektoru.

Popis literature

- ¹ Christian Bierlich, Smita Chakraborty, Nishita Desai, Leif Gellersen, Ilkka Helenius, Philip Ilten, Leif Lönnblad, Stephen Mrenna, Stefan Prestel, Christian Tobias Preuss, et al. A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3. *SciPost Physics Codebases*, page 008, 2022.
- ² Peter Skands, Stefano Carrazza, and Juan Rojo. Tuning PYTHIA 8.1: the Monash 2013 tune. *The European Physical Journal C*, 74(8):3024, 2014.
- ³ Tai Sakuma, Michael Hoch, and Achintya Rao. "ZOOOM": Drawings of the CMS detector with SketchUp; URL: <https://cds.cern.ch/record/2629326>. 2012.
- ⁴ Michael A Stephens. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons. *Journal of the American statistical Association*, 69(347):730–737, 1974.
- ⁵ Tae Kyun Kim. Understanding one-way ANOVA using conceptual figures. *Korean journal of anesthesiology*, 70(1):22–26, 2017.
- ⁶ S. Navas *et al.* (Particle Data Group). Review of particle physics. *Physical Review D*, 110(3):030001, 2024.
- ⁷ William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media, 1994.
- ⁸ Georg Viehhauser and Tony Weidberg. *Detectors in Particle Physics: A Modern Introduction*. Taylor & Francis, 2024.
- ⁹ R. M. Sealock A. Eppich. Studies of a Lead Glass Total-Absorption-Counter; URL: https://www.jlab.org/hall-b/notes/clas_notes93/note93-011.pdf.