

Određivanje karakteristika događaja generiranih različito ugođenim kvantnodinamičkim simulatorom

Marko Husar

Samostalni seminar iz istraživanja u fizici

Mentor: *izv. prof. dr. sc.* Nikola Poljak

siječanj 2025.

Simulator PYTHIA 8.3

- program za simuliranje visokoenergetskih sudara čestica
- najčešće korišteni Monte Carlo simulator događaja u FEČ
- mnogi fizikalni procesi opisani neperturbativnom QCD fizikom
 - potrebna ugađanja skupova podataka



PYTHIA logo

Simulator PYTHIA 8.3

Tune I4

- Monash 2013 tune
- standard za pp sudare

Tune 05

- ugađanje za reprodukciju podataka iz rane faze mjerenja na LHC-u

Tune 05

- ATLAS A14 central tune

Motivacija

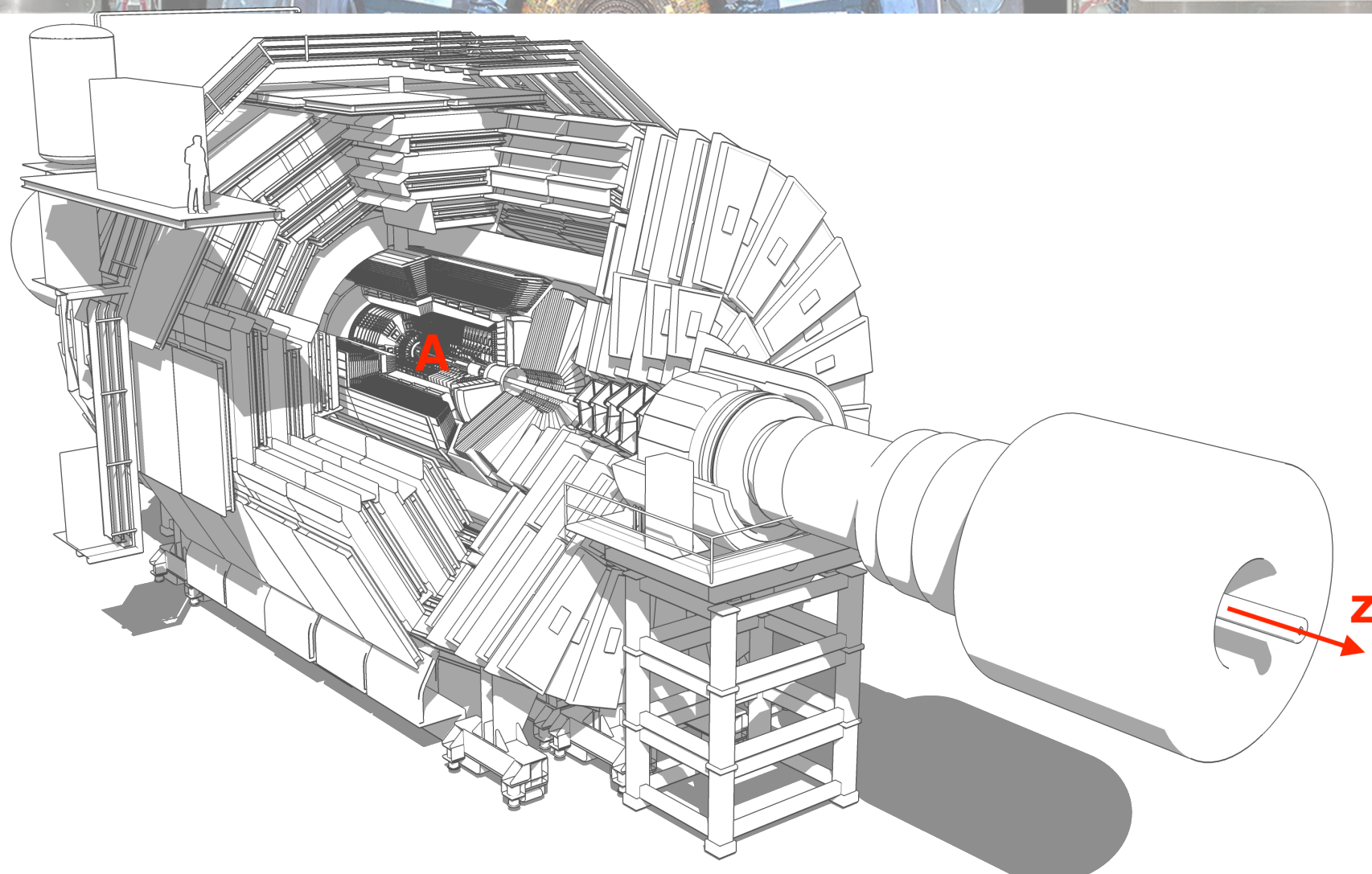
- uspoređujemo distribucije transverzalnih impulsa fotona

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

- sva ugađanja dobro i slično opisuju procese u centralnom dijelu detektora
- najveće razlike među distribucijama očekujemo za tzv. *forward* čestice (čestice niskih vrijednosti parametra p_T)

I. UVOD

Motivacija



Normalizirani histogrami i pripadne greške

- relativna frekvencija $f_{r,i} = f_i/N$ $N = \sum_{i=1}^{\xi} f_i$
- relativna nepouzdanost $\sigma_i = 1/\sqrt{f_i}$
- relativna greška i-tog razreda ovisi o nepouzdanostima u svim razredima histograma:

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

Statistički testovi za distribucije

1) Kolmogorov – Smirnov test

- rezultat je veličina koja se naziva KS statistikom

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

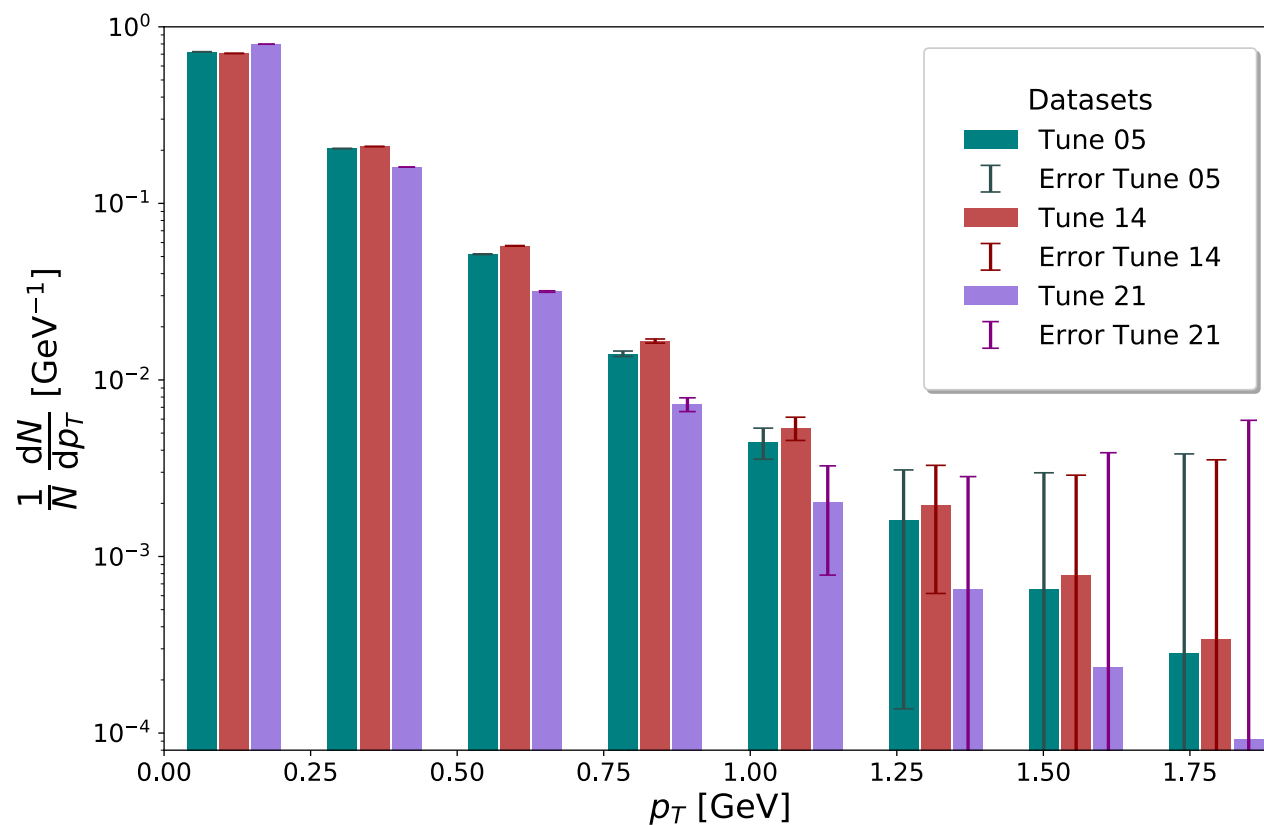
2) ANOVA (eng. *Analysis of variance*)

- skup modela za analizu razlika među uzorcima usporedbom varijanci
- nul-hipotezu odbacujemo kada $F \geq F_{crit.}$
- za račun kritične vrijednosti moramo znati broj stupnjeva slobode

$$DoF = \xi - 2$$

II. GENERIRANJE p_T DISTRIBUCIJA FOTONA

Fotoni nastali u pp sudarima na 100 GeV-a



Normalizirani histogrami transverzalnih impulsa fotona nastalih u pp sudarima na energiji od 100 GeV-a u sustavu centra impulsa

Fotoni nastali u pp sudarima na 100 GeV-a

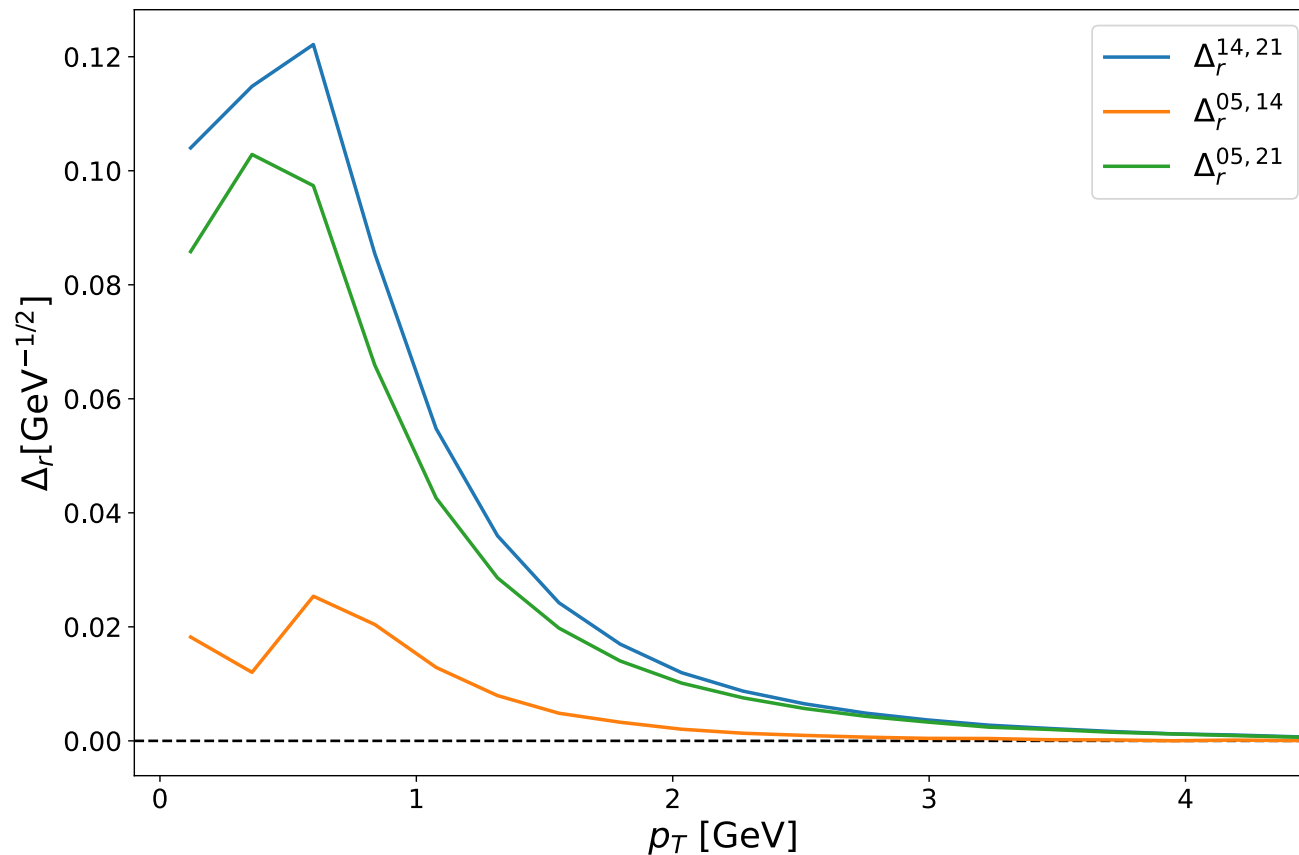
- Relativnu razliku i -tog razreda generiranog s ugađanjima a i b definiramo kao

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

- Ovako definirana relativna razlika nije jednaka KS statistici $D_{a,b}$.

II. GENERIRANJE p_T DISTRIBUCIJA FOTONA

Fotoni nastali u pp sudarima na 100 GeV-a



Relativne razlike između fotonских p_T distribucija dobivenima različitim ugađanjima



II. GENERIRANJE p_T DISTRIBUCIJA FOTONA

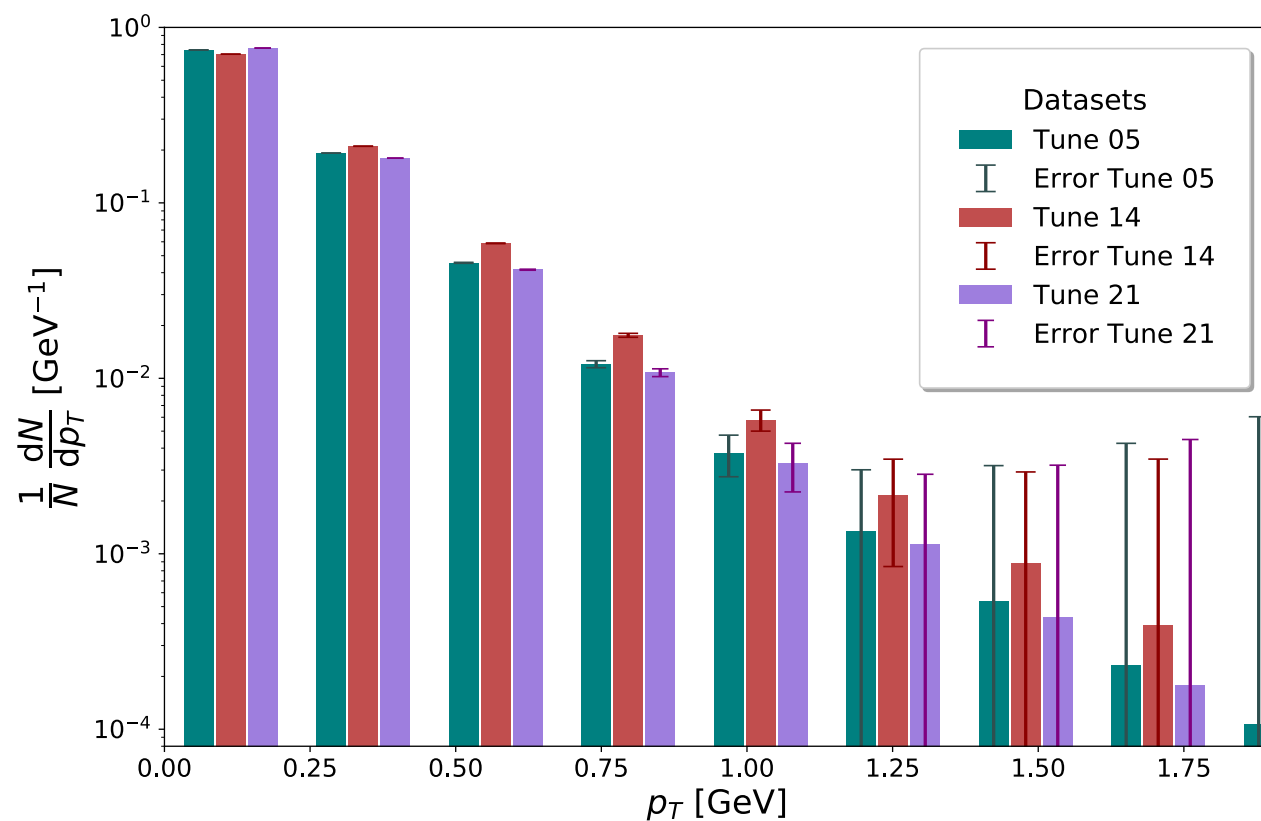
Fotoni nastali u pp sudarima na 100 GeV-a

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

Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije

II. GENERIRANJE p_T DISTRIBUCIJA FOTONA

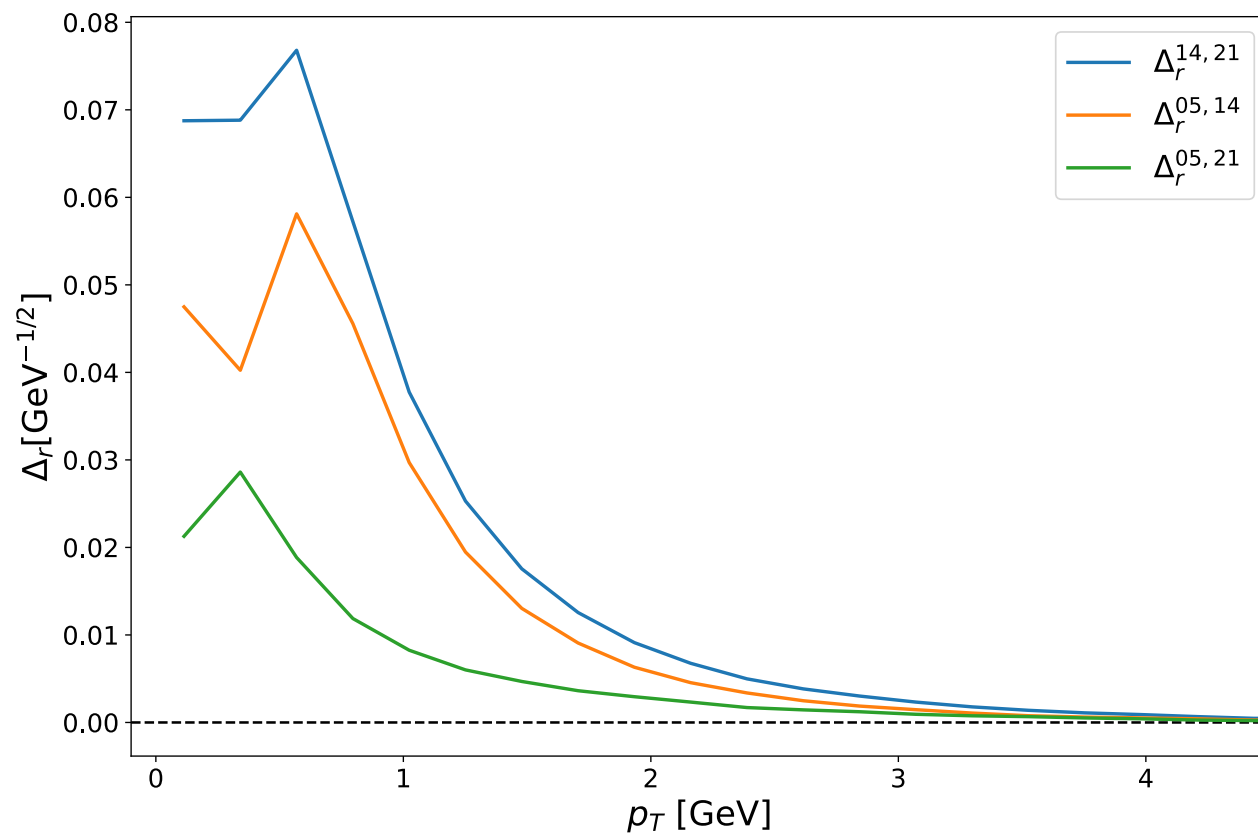
Fotoni iz raspada π^0 na 100 GeV-a



Normalizirani histogrami transverzalnih impulsa fotona iz raspada π^0 koji su nastali u pp sudarima na energiji od 100 GeV-a u sustavu centra impulsa

II. GENERIRANJE p_T DISTRIBUCIJA FOTONA

Fotoni iz raspada π^0 na 100 GeV-a



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

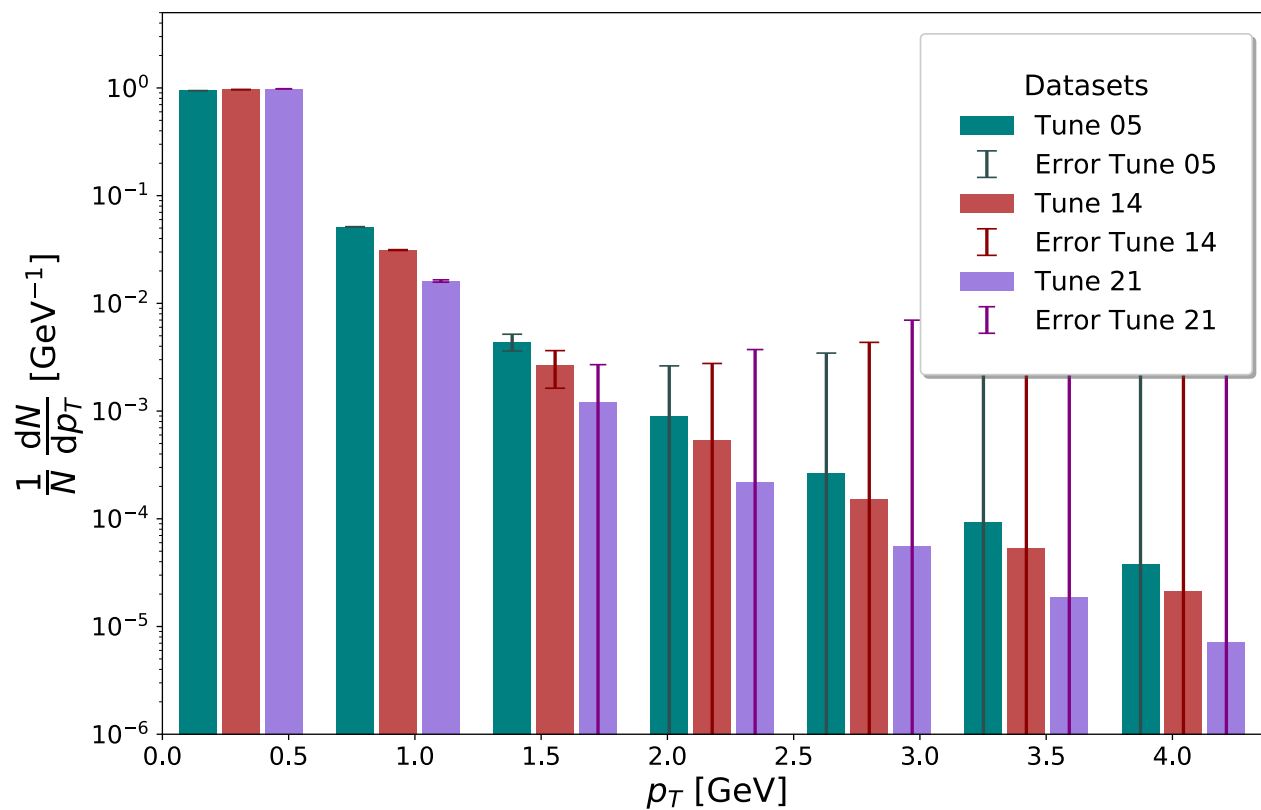
Fotoni iz raspada π^0 na 100 GeV-a

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

Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije

II. GENERIRANJE p_T DISTRIBUCIJA FOTONA

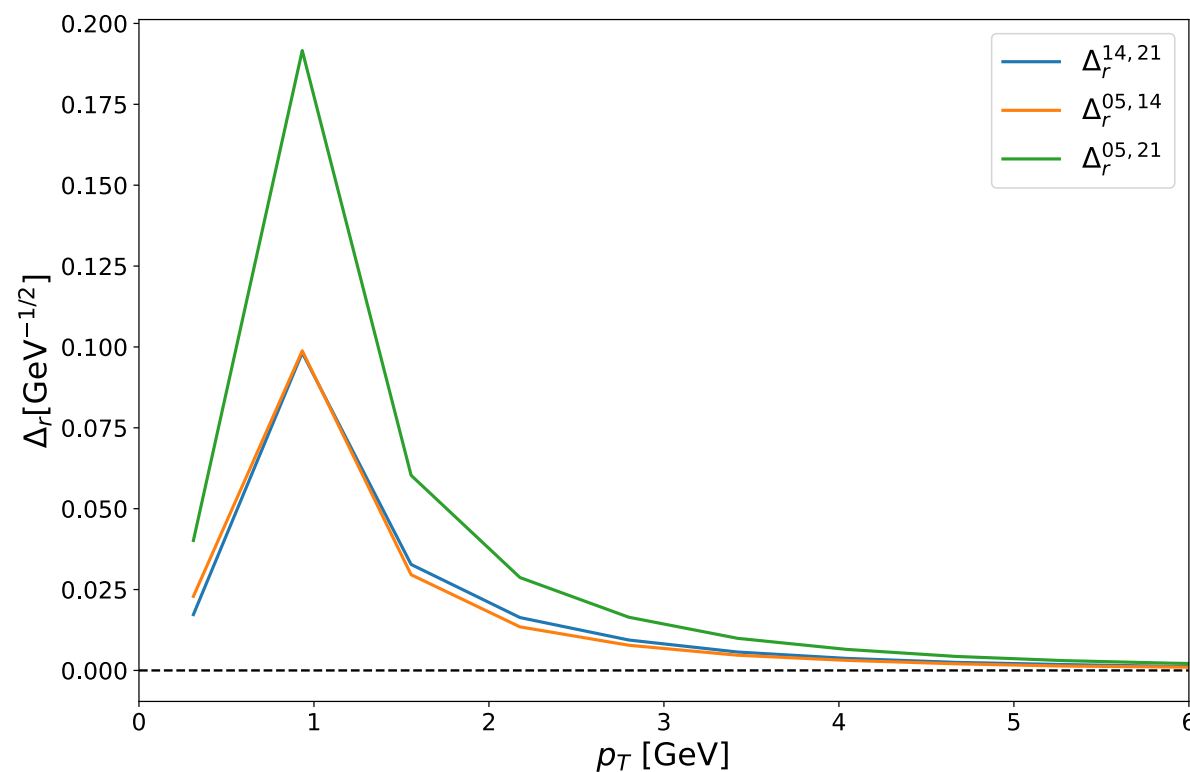
Fotoni iz raspada π^0 na 13 TeV-a



Normalizirani histogrami transverzalnih impulsa fotona iz raspada π^0 koji su nastali u pp sudarima na energiji od 13 TeV-a u sustavu centra impulsa

II. GENERIRANJE p_T DISTRIBUCIJA FOTONA

Fotoni iz raspada π^0 na 13 TeV-a



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

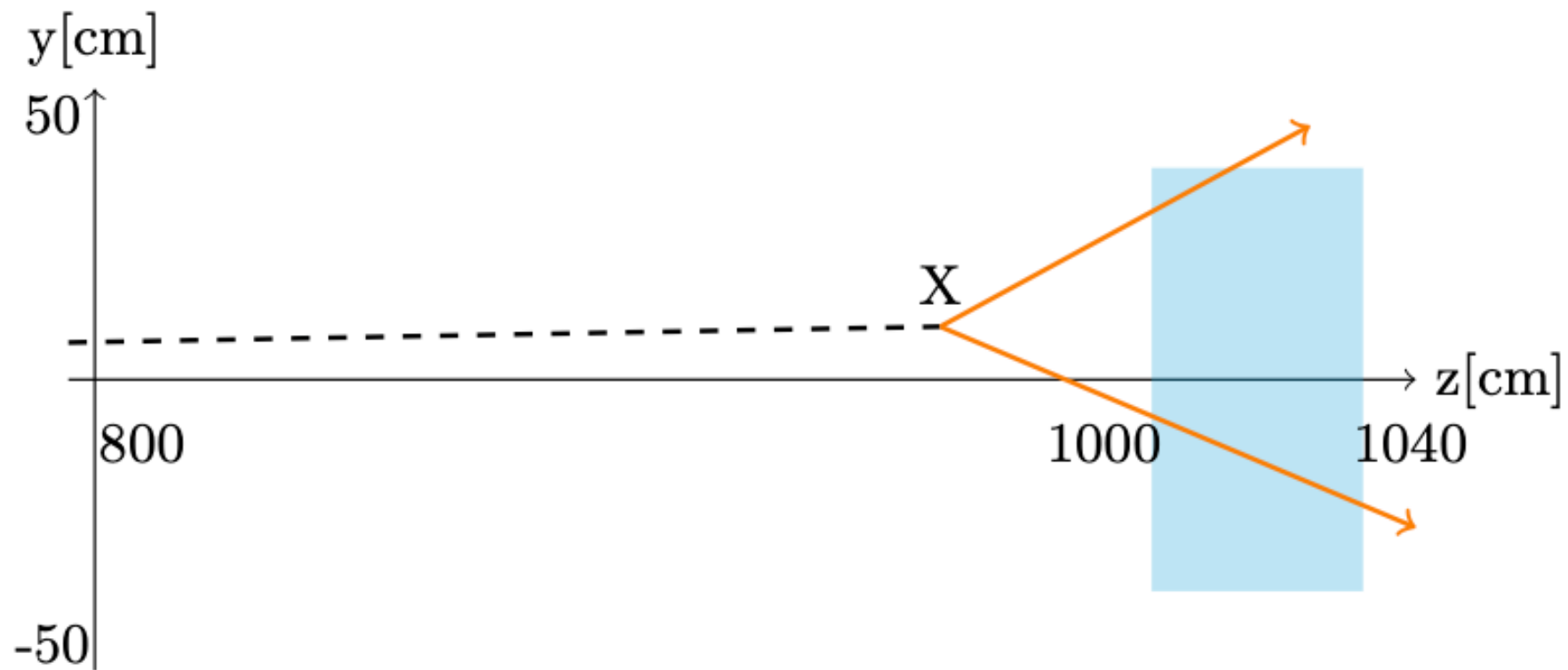
Fotoni iz raspada π^0 na 13 TeV-a

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

Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije

III. SIMULACIJA DETEKTORSKOG ODAZIVA

Detektorski postav



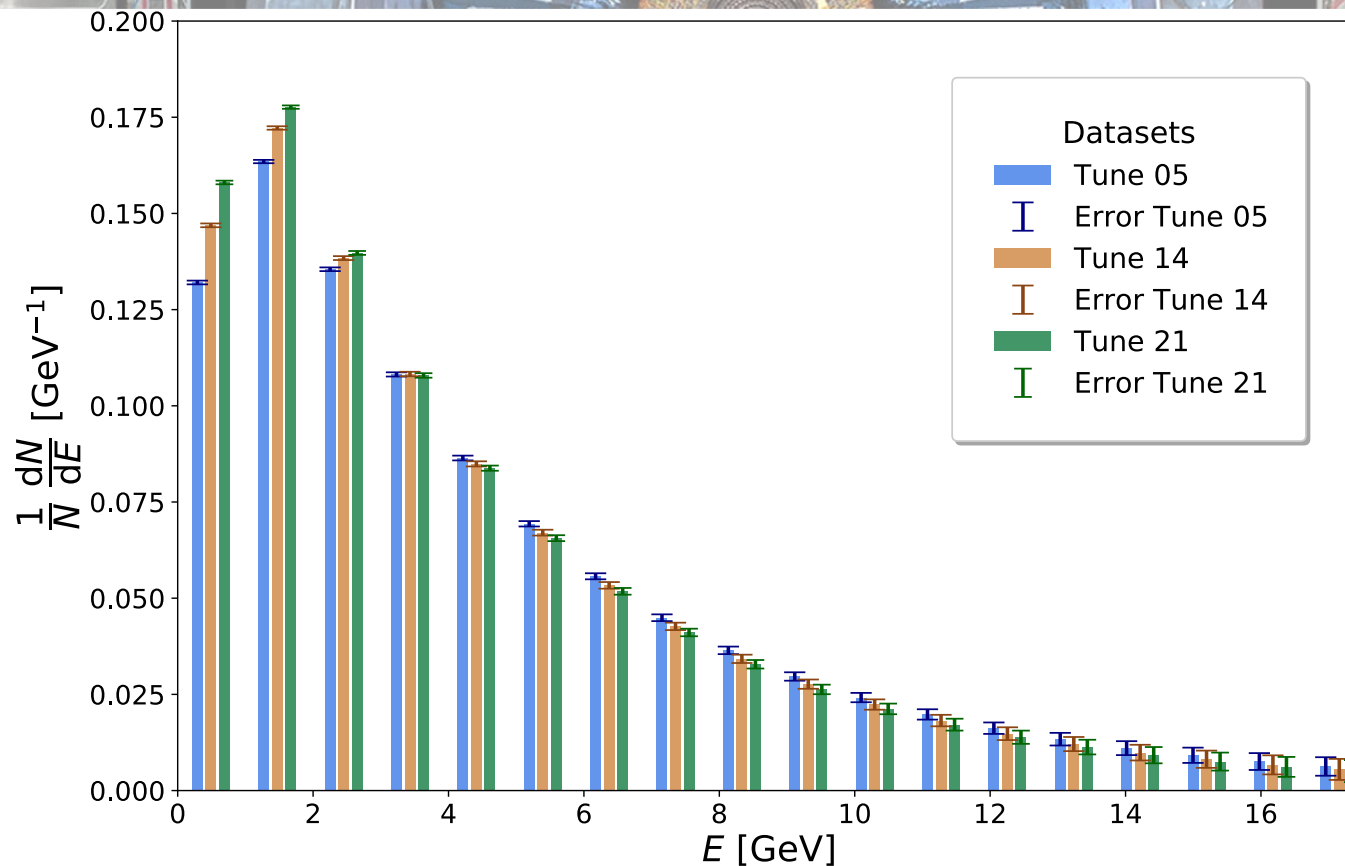
Depozicija energije

- fotonska atenuacija intenziteta: $I(x) = I_0 \cdot \exp(-\mu x)$
- deponirana energija: $E(x) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{7}{9} \frac{x}{X_0}\right)$
- Materijal koji simuliramo je NaI(Tl) s radijacijskom duljinom

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

III. SIMULACIJA DETEKTORSKOG ODAZIVA

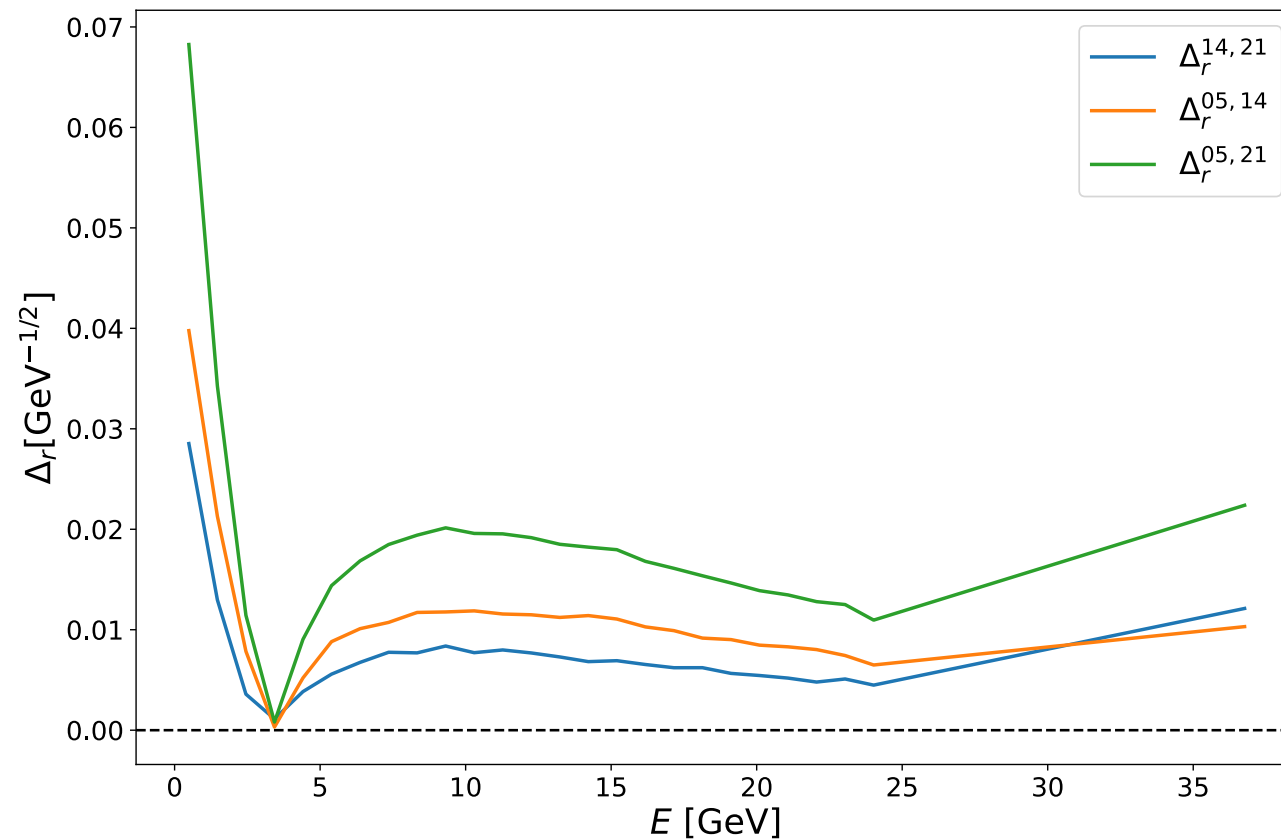
Detektorski odaziv



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

III. SIMULACIJA DETEKTORSKOG ODAZIVA

Detektorski odaziv



Relativne razlike deponiranih energijskih distribucija dobivenih različitim ugađanjima

III. SIMULACIJA DETEKTORSKOG ODAZIVA

Detektorski odaziv

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

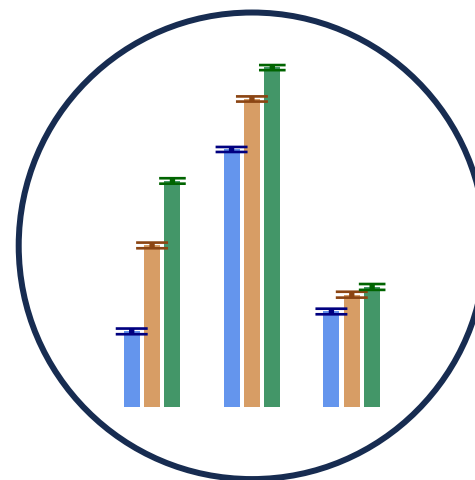
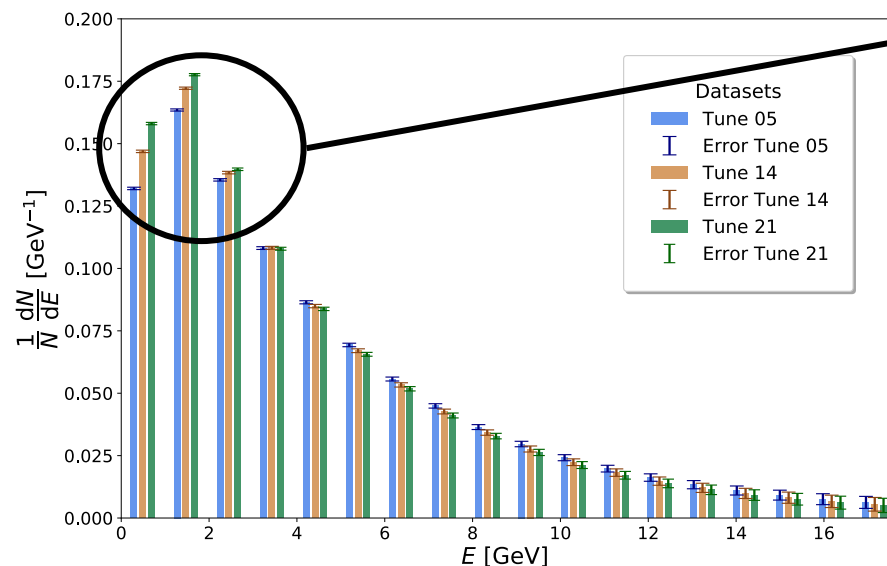
Rezultati KS i ANOVA testova za distribucije deponiranih energija u detektoru

Zaključak

- ukupno generirano $2.61 \cdot 10^8$ događaja
- p_T distribucije se najviše razlikuju u području niskih vrijednosti
- najveće razlike među ugađanjima za distribucije iz raspada piona na 13 TeV-a (35.71%)
- razlike među ugađanjima osjetljive na promjenu energije
- ne postoje signifikantne razlike među distribucijama ukoliko u obzir uzimamo cijeli raspon vrijednosti
- razlike u *forward* području detektora

Zaključak

- ne postoje značajne razlike distribucija deponiranih energija u cijelom rasponu



➤ statističke razlike u spektru niskoenergijskih fotona



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.