

Ա. Ի. ԱԼԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ
(ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ)

Ղումարյան Հագարավարդ Մարտինի

PYTHIA8 Մոնտե Կարլո գեներատորի պարամետրերի կարգաբերումը (tuning)
Բելլե 2 գիտափորձի համար

Ա.04.16 - «Միջուկի, տարրական մասնիկների և տիեզերական
ճառագայթների ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական
գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

ՍԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ – 2025

A. I. ALIKHANYAN NATIONAL SCIENCE LABORATORY
(YEREVAN PHYSICS INSTITUTE)

Hazaravard Ghumaryan

Pythia8 Monte Carlo Generator Tuning for the Belle II Experiment

SYNOPSIS

of the Dissertation in 01.04.16 - “Nuclear, elementary particles and cosmic ray
physics” presented for the degree of candidate in physical and mathematical sciences

YEREVAN – 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Ա. Ի. Ալիխանյանի անվան ազգային գիտական լաբորատորիայի (ԵրՖԻ) գիտական խորհրդում

Գիտական ղեկավար՝

Ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու՝

Քառյան Գևորգ Արարատի (ԱԱԳԼ)

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր՝

Բալաբեկյան Անահիտ Ռաֆիկի (ԵՊՀ)

Ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու՝

Մովսիսյան Արամ Գագիկի (ԱԱԳԼ)

Առաջատար կազմակերպություն՝

Երևանի Պետական Համալսարան (ԵՊՀ)

Պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ.-ի փետրվարի 10-ին՝ ժամը 14:00-ին, ԱԱԳԼ-ում գործող ԲԿԳԿ-ի 024 «Ֆիզիկայի» մասնագիտական խորհրդում (Երևան, 0036, Ալիխանյան եղբայրների փ. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ԱԱԳԼ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2025թ-ի հունվարի 9-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտ. քարտուղար

Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր՝

Հրաչյա Մարուքյան

The subject of the dissertation is approved by the scientific council of the A. I. Alikhanyan National Science Laboratory (YerPhI).

Scientific supervisor:

Candidate in phys-math. sciences

Gevorg Karyan (AANL)

Official opponents:

Doctor of phys-math. sciences

Anahit Balabekyan (YSU)

Candidate in phys-math. sciences

Aram Movsisyan (AANL)

Leading organization:

Yerevan State University (YSU)

The defense will take place on the 10 February 2025 at 14:00 during the "Physics" professional council session of HESC 024 acting within AANL (2 Alikhanyan brothers str., 0036, Yerevan).

The dissertation is available at the AANL library.

The synopsis is sent out on the 09 January 2025.

Scientific secretary of the special council:

Doctor of phys-math. sciences

Hrachya Marukyan

Thesis relevance

This thesis addresses the tuning of the Pythia8 Monte Carlo event generator [1] for the Belle II experiment [2], which is essential for producing accurate simulations of high-energy particle collisions at the SuperKEKB accelerator. Pythia8 is a key tool for modeling processes such as parton showers, hadronization, and multiple parton interactions. However, the accuracy of these simulations relies on careful tuning [3] of its parameters to match experimental data, which is crucial for studying rare decay processes and phenomena beyond the Standard Model. The tuning process in this work is performed using the Professor2 package [4], a powerful tool for multi-parameter optimization. Professor2 allows for the precise adjustment of sensitive parameters, improving the agreement between simulated and experimental data. This iterative process includes sensitivity analysis to prioritize the most impactful parameters and advanced optimization algorithms such as grid search and evolutionary methods to refine them. By systematically reducing discrepancies, the tuning improves the reliability of the simulations used in the Belle II data analyses. Ultimately, this tuning work ensures that Pythia8 simulations closely mirror real particle interactions, supporting the accurate interpretation of experimental results and aiding in the exploration of New Physics (NP) phenomena. The thesis involves a comprehensive approach to fine-tuning the Pythia8 Monte Carlo event generator, addressing both technical and physics related aspects:

1. Technical Implementation:

- Develop and automate necessary packages, handling multiparameter files.
- Custom bash scripts to link and automate the workflow.

2. Monte Carlo Studies:

- Conduct simulations using Pythia6 and Pythia8.

-
- Compare simulations with experimental data to ensure accuracy, analyzing both at the generator level and the reconstruction level.

3. Sensitivity Analysis:

- Perform sensitivity tests [5] to identify the key Pythia8 parameters that have the most significant impact on simulation outcomes.

4. Tuning Process:

- Compare the default Pythia8 settings with the experimental data and previous Belle tunes.
- Refine the parameters and validate them against reference data.

5. Challenges:

- Manage computational resources using a global Grid network [6].
- Handle multi-parameter tuning complexities such as correlations between parameters.

6. Validation and Collaboration:

- Validate results by generating Monte Carlo files shared with the Belle II collaboration for further testing and feedback, ensuring a thorough evaluation.

This process helps improve the accuracy of simulations and provides better alignment with the experimental data.

Relevance of the research topic

The Monte Carlo method plays a fundamental role in high-energy particle physics experiments, serving as a crucial tool for both data correction and the

estimation of contributions from various physical phenomena observed in the experiments. Numerous computational packages rely on this method to improve the understanding of experimental results. In this context, it is essential to ensure consistency between the phenomenological models used in the Monte Carlo generators and the experimental data. Furthermore, selecting the most appropriate model is critical to achieving the best possible description of the data, allowing researchers to impose constraints on competing models. Therefore, this research is highly relevant as it contributes to refining the accuracy and applicability of Monte Carlo simulations in particle physics.

The aims of the thesis

The aim of this thesis is to identify the minimum set of parameters necessary to accurately describe the hadron production process (hadronization) using data from the Belle II International Collaboration as a reference. By minimizing the number of parameters in the tuning list, the goal is to avoid difficulties in multi-parameter optimization caused by correlations between parameters, while ensuring that the selected parameters maintain sufficient sensitivity to effectively describe the physics observables of interest.

Scientific novelty

This thesis presents significant advances in the tuning of the Pythia8 Monte Carlo generator specifically for the Belle II experiment. The following key contributions highlight the scientific novelty of this work:

1. **Customized Tuning for Electron-Positron Beams:** This research introduces a dedicated tuning process for Monte Carlo simulations in electron-positron collisions, a critical area that had not been comprehensively addressed in previous studies. This focused approach improves the

accuracy of simulations in representing experimental conditions, which is essential to explore rare decay processes.

2. Implementation of a Multi-Parameter Optimization Framework:

The use of the Professor2 package for multi-parameter optimization marks a novel approach in handling the complexities associated with high-energy physics experiments. The sophisticated algorithms used facilitate efficient exploration of the parameter space, leading to more reliable tuning results.

3. Comprehensive Sensitivity Analysis: The thesis includes an extensive sensitivity analysis of Pythia8 parameters, identifying key parameters that significantly affect simulation results.

Overall, the results and methodologies presented in this thesis contribute valuable insights and practical advancements to the field of particle physics, particularly in the context of Monte Carlo simulations and their application to experimental data analysis.

Practical and experimental significance

The tuning of the Pythia8 event generator for the Belle II experiment is essential for accurately modeling hadron production, particularly hadronization processes. By minimizing the number of parameters while ensuring that they are sensitive to key physics observables, the tuning process avoids complications from parameter correlations. Using the generated data, the sensitivity of each parameter is tested with statistical tools such as the Kolmogorov-Smirnov and Student's t-tests. The Professor2 package is used to identify the most sensitive parameters. This modern approach, which adjusts multiple parameters simultaneously through polynomial fitting, enhances both the accuracy and efficiency of the tuning, crucial for complex models like those used in the Monte Carlo model. After tuning the sensitive parameters of the event generator, the

agreement between Monte Carlo simulations and experimental continuum data show significant improvement.

Approbation of the work

The research results discussed in this thesis have been shared and validated through several important platforms. Firstly, the results were highlighted in main meetings of the Belle II collaboration. In addition, the results were presented at international conferences and workshops, where scientists from around the world gather to discuss advances in high-energy physics. These events provide a crucial opportunity to receive feedback from experts in the field, helping to improve and refine the work. These meetings involve members of the Belle II experiment, who work together to evaluate ongoing research and ensure that findings align with the goals of the collaboration. Furthermore, the results were shared during seminars at AANL , where they were discussed in depth.

Structure of the thesis

The dissertation work consists of 7 chapters including an introduction and conclusion, and a list of references used. Together, it consists of 108 pages, includes 16 tables, and 152 plots.

Chapter 1 Chapter 1 The Introduction describes the following key aspects:

1. Overview of the Belle II experiment: The Belle II experiment at KEK studies rare particle decays and CP violation, searching for new physics beyond the Standard Model. It builds on the original Belle experiment with advanced detectors and a high-luminosity accelerator.
2. Role of Monte Carlo Simulations: Discussion of the importance of MC simulations in analyzing particle interactions and the specific use of the Pythia8

generator.

3. Tuning of Pythia8 Parameters : An explanation of the necessity of tuning the generator parameters to achieve accurate alignment with the experimental data.
4. Application of the Professor2 package: An overview of how the Professor2 package is utilized for parameter optimization in the tuning process.
5. Significance of the Research: A summary of the broader implications of the tuning process for studying rare phenomena and theoretical models within the Belle II framework.

Chapter 2 provides an in-depth exploration of the Belle II experiment, detailing its components and functionalities. The contents are structured as follows:

2.1 An overview of the SuperKEKB accelerator, including its design, operational principles, and its importance in enabling high-luminosity experiments. SuperKEKB is an upgraded asymmetric-energy electron-positron collider at KEK, Japan, designed to achieve 40 times the luminosity of its predecessor KEKB. It aims to measure CP violation in B mesons, with a design luminosity of $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The Belle II detector at SuperKEKB features sub-detectors for precise tracking, particle identification, and energy measurements, enabling detailed studies of B meson decays. Key components include the Vertex Detector (VXD), Central Drift Chamber (CDC), Time of Propagation Counter (TOP), Aerogel Ring Imaging Cherenkov (ARICH), Electromagnetic Calorimeter (ECL), and KLong and Muon Detector (KLM), arranged in cylindrical layers around the interaction point.

§ **2.2** A description of the VXD, focusing on its role in tracking and reconstructing particle trajectories near the collision point. VXD consists of two components: the Pixel Vertex Detector (PXD) and the Silicon Vertex Detector (SVD). The PXD, located at radii of 14 mm and 22 mm, uses DEPFET pixel sensors for high-precision vertex measurements. The SVD, surrounding the

PXD, is made of four layers of double-sided silicon strip detectors (DSSDs) arranged in a ladder structure (L3 to L6). The SVD can detect particles within $17^\circ < \theta < 150^\circ$ and reconstruct low transverse momentum particles down to a few tens of MeV/c.

§ **2.3** Details regarding the CDC, including its function in detecting charged particles and providing momentum measurements. CDC consists of 14,336 sense wires arranged in 56 layers, with radii from 160 mm to 1130 mm, and is filled with a helium-ethane gas mixture (He-C₂H₆). It reconstructs charged tracks, measures momenta, aids in particle identification (PID) through energy loss, and provides trigger signals. The CDC operates in a 1.5 T magnetic field and covers a polar angle range of $17^\circ < \theta < 150^\circ$, similar to the VXD.

§ **2.4** An explanation of the TOP detector's capabilities in determining the time of flight of particles, aiding in particle identification. The TOP detector is a key part of the PID system, located in the barrel region of Belle II. It consists of 16 quartz bar segments (275 cm long, 2 cm thick) at a radius of 1200 mm. Particles emit Čerenkov light when traveling faster than the speed of light in quartz. The emitted photons are captured by photomultiplier tubes (PMTs), with a time resolution of 100 ps, allowing for precise particle identification by measuring the velocity and mass of the particles.

§ **2.5** A discussion of the ARICH detector, highlighting its role in identifying charged particles based on their velocities. The ARICH detector, located in the forward endcap of Belle II, identifies charged particles (pions and kaons) in the momentum range of 0.4 to 4 GeV/c. Using a double-layer aerogel radiator, it achieves better than 4 separation between kaons and pions. The ARICH system also discriminates between pions, muons, and electrons below 1 GeV/c, aiding in heavy flavor tagging. It works alongside the TOP counter for particle identification in the forward and barrel regions.

§ **2.6** An overview of KLM design and its role in particle identification at the Belle II experiment The KLM detector, located beyond the ECL, identifies

K0L mesons and muons while serving as a magnetic flux return for the Belle II solenoid. It consists of iron plates and RPC superlayers, providing efficient detection and high background resilience, particularly in the barrel and endcap sections.

§ **2.7** An overview of the ECL in the Belle II experiment highlights its role in detecting photons and neutral particles with high precision. Comprising 8,736 CsI(Tl) crystals, it provides excellent energy resolution and serves as a primary trigger source, significantly improving particle identification capabilities.

§ **2.8** A summary of the Belle II software framework, detailing the tools and systems used for data acquisition, processing, and analysis.

Chapter 3 provides a comprehensive overview of the Pythia8 Monte Carlo Event Generator, focusing on its functionalities and key concepts. The contents are structured as follows:

§ **3.1** An overview of hadronization in Pythia8 shows the use of the Lund String Model to simulate the transformation of quarks into hadrons, with adjustable parameters for tuning. Tuning and customization in Pythia8 highlights its flexibility in adjusting key parameters to match experimental data.

Chapter 4 An overview of the tuning procedure in Pythia8 uses the Professor2 package for multi-parameter optimization, focusing on minimizing discrepancies between Monte Carlo and reference data. Parameters are sampled, Monte Carlo samples are generated, and interpolation via a characteristic polynomial is used to refine the model for better agreement with experimental observations.

§ **4.1** This section outlines key observables used in the tuning process for SuperKEKB's electron-positron collisions. The focus is on the off-resonance data, which is essential for studying background processes and continuum events.

§ **4.2** An overview of the sensitivity check involves using normalized residuals to compare observed data with model predictions. Deviations greater than two (standard deviation) indicate statistical significance, while consistent shifts

suggest systematic discrepancies between distributions.

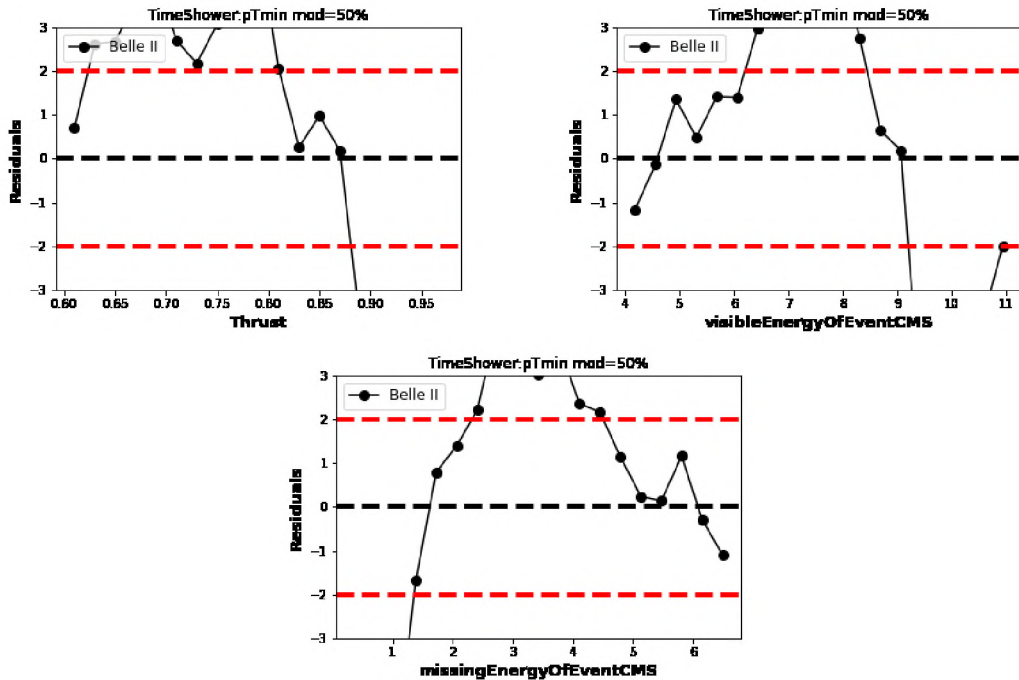


Figure 1: Sensitivity checks (varying parameters from their default values)

We performed a two-sample test to compare event variables. Plots show deviations around zero, with deviations less than two indicating no significant difference. Deviations greater than two suggested statistically significant differences, and consistent shifts in one direction indicated a systematic shift between the distributions.

§ **4.3** An overview of the Professor II method emphasizes its shift from manual tuning to automated, parameterization based optimization. By fitting polynomials to the generator’s response for each observable bin. Professor II constructs a goodness of fit (GoF) function, which is minimized to find the optimal parameter vector. The process is efficient, requiring only a few days to generate reference data and minutes to derive optimal parameters. The weighted χ^2 function is used to evaluate the goodness of fit, adjusting for the significance of different observables. This method significantly improves tuning speed and accuracy compared to manual approaches.

§ 4.4 Beam background introduces discrepancies in key observables, with our evaluation showing an approximate 10% discrepancy.

§ 4.5 The section shows 2D scatter plots of key Pythia8 parameters, illustrating the initial sampling phase. These parameters, controlling hadronization and quark-flavor transitions, are optimized to improve the match between the simulation and experimental data.

§ 4.6 This section discusses the use of envelope plots to visualize the range of values for each parameter in the tuning process. Critical observables include Fox-Wolfram moments, thrust, visible energy, and missing momentum.

The plots, generated with the Professor2 tool, show the area encompassing observable distributions within the chosen parameter ranges. The results confirm the adequacy of these ranges, as the envelopes largely cover the reference data, with some minor deviations due to the maximum fit achievable with Pythia.

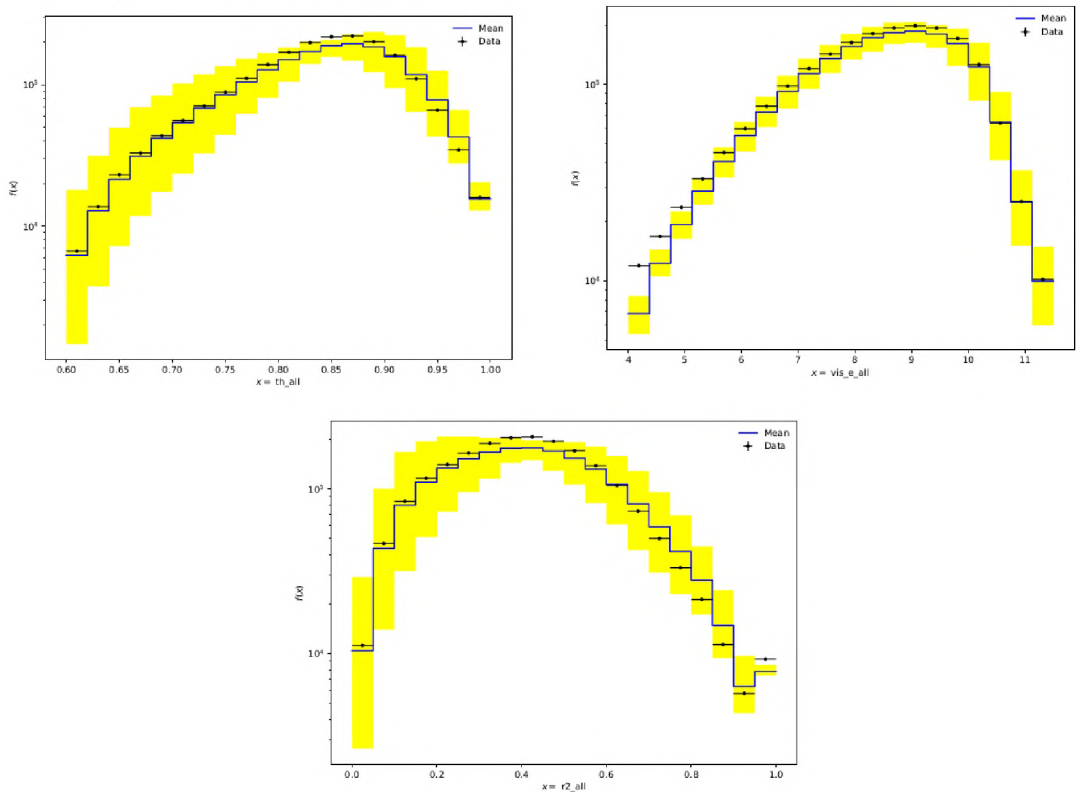


Figure 2: Comparison of the envelope fits to the reference data for the thrust, visible energy, and Fox-Wolfram moment distributions.

The figures show that the envelopes cover most of the reference data, confirming the parameter ranges are suitable. Some gaps occur due to the maximum fit achievable with Pythia.

§4.7 This section details the comprehensive Pythia8 tuning validation process conducted for the Belle II experiment using the Professor2 package. The tuning approach began with a comparative analysis of Monte Carlo events, examining quark flavor dependencies— $u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$, $c\bar{c}$, and others, along with leptonic events (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, etc.)—displayed in stacked histograms to observe the influence of different quark contributions.

§4.7.1 This section describes the first-stage Pythia8 tuning using three observables: thrust, inclusive charged particle momentum spectra, and the number of tracks per event. The tuning process, validated with Professor2, addressed statistical robustness and parameter correlations, achieving close agreement between tuned and reference distributions.

§4.7.2 In this stage, the `visibleEnergyOfEventCMS` variable was added to the observables for tuning. The tuning performed by using a 5th-order polynomial, achieved excellent agreement between tuned and reference distributions.

Chapter 5 This section outlines the dataset used in the analysis, consisting of experimental data from SuperKEKB and Monte Carlo simulations generated with Pythia8. It discusses the comparison between MC and experimental data and the use of the Professor2 package for tuning simulation parameters. Specific parameters for simulating light and heavy quarks are also provided.

5.1 This section describes the event selection criteria used in the analysis to ensure high quality data. It outlines cuts for "good tracks", "good clusters", "minimum numbers of tracks and clusters", "visible energy", and "momentum balance". These criteria help isolate significant physics events, reduce background noise, and improve the signal-to-noise ratio, ensuring that the analysis focuses on relevant events for the study.

5.2 This section compares event shape variables between the Pythia6 [7]

and Pythia8 Monte Carlo generators, highlighting differences due to updates in hadronization, parton showers, and parton interactions in Pythia8. It explains that the default parameter values of Pythia6 and Pythia8 differ significantly, leading to discrepancies in event shape distributions. A Table of Correspondence (ToC) was used to align the generators, improving the consistency of the distributions between the two.

5.3 This section compares the "old Belle" and "Belle-Note-780" tuning parameters for the Pythia6 Monte Carlo generator. The comparison aimed to assess the impact of these tune differences on the generated Monte Carlo events.

§5.4 This section compares Belle II MC data with the "old Belle" Pythia6 tune to show how updates in Belle II simulations improve comparison with Belle II data.

§5.5 This section compares Belle II simulations with the Belle-Note-780 Pythia6 tune, showing significant differences in distributions and highlighting a lack of agreement with Belle II MC data.

§5.6 This section compares standalone Pythia8 Monte Carlo simulations with Belle experimental data, focusing on differential cross sections for pions, kaons, and protons. Simulations use Belle-specific beam configurations, angular acceptance, and momentum constraints to replicate experimental conditions.

Chapter 6 This chapter focuses on comparing standalone Pythia8 Monte Carlo (MC) simulations with experimental data from Belle.

6.1 Before proceeding to the main tuning stage, several algorithms were developed and automated.

6.2 This section validates the tuned Pythia8 parameters [8] M. G. Hazaravard, "Pythia8 MC Tuning Validation Using the Professor2 Package," *Mathematical Problems of Computer Science*, DOI: <https://doi.org/10.51408/1963-0112>., showing improved agreement between the new Monte Carlo samples and the experimental data, improving the simulation accuracy for Belle II analyzes. The obtained results were regularly presented at collaboration meetings. Monte

Carlo events were generated by collaboration members, who set the tuning parameters and values we suggested. Using our tuned parameters, the Belle II Data Production group produced a sample that has been analyzed by different physics groups within Belle II for various studies. For validation, members conducted their own studies on the variables of interest. An example was studied by Sen Yan. Comparisons of old MC, new MC, and data were based on the process $e^+e^- \rightarrow D_s^+ K^{*0} D^{(*)+}$ using old datasets and our dataset.

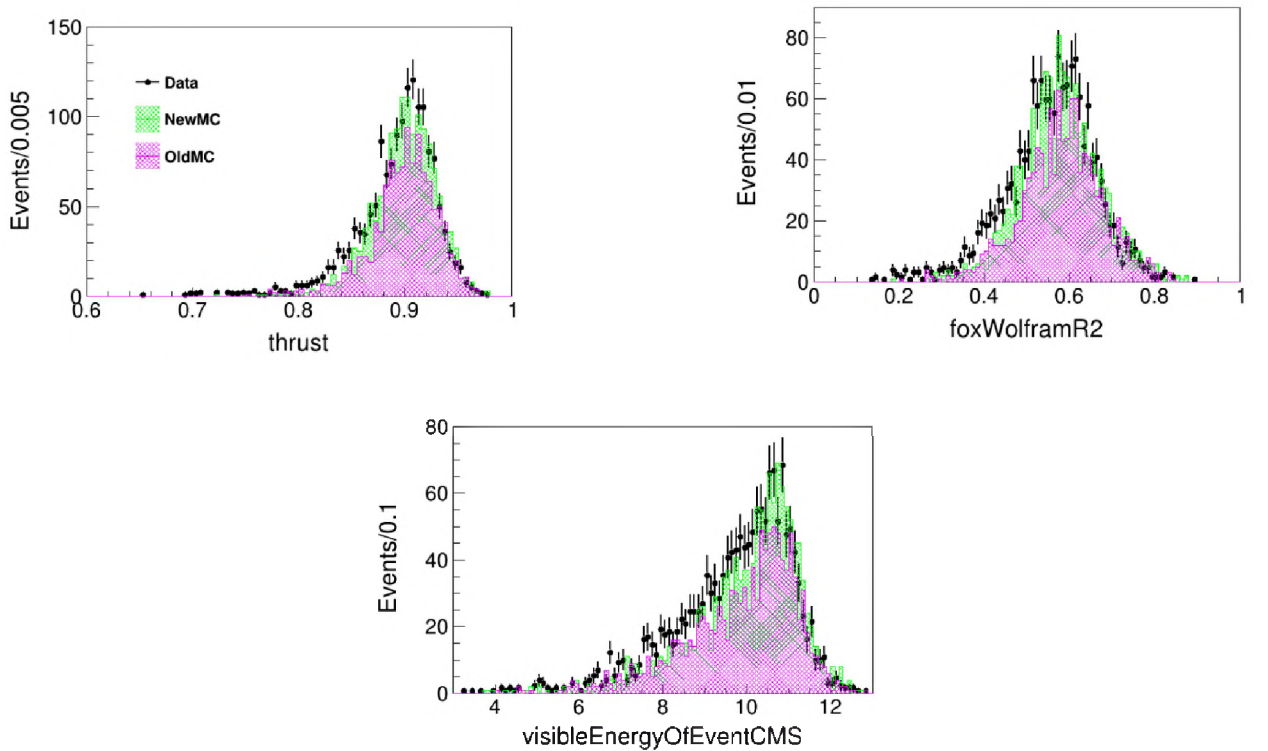


Figure 3: Validation results of thrust, Fox-Wolfram moment, and visible energy distributions comparing data, NewMC, and OldMC.

Main results

The tuning of Monte Carlo parameters in the Pythia8 event generator significantly improved the agreement between the simulated off-resonance Monte Carlo data and the experimental continuum data. Several key observables were analyzed to assess the effectiveness of the tuning procedure. The results

are summarized as follows: Initially, the off-resonance Monte Carlo simulation exhibited a notable discrepancy from the continuum data. After tuning, the simulation showed improved agreement with the continuum data, confirming the effectiveness of the tuning. As a result of this process, the tuned parameter values for the simulation were obtained. These values, shown in the table, reflect the optimal configuration achieved after the extensive tuning procedure, offering the best possible agreement between the simulation and experimental data.

The tuning of Monte Carlo parameters markedly improved the agreement between simulated off-resonance data and real continuum data across multiple observables, including charged particle multiplicity, track counts, thrust, R_2 distributions, missing momentum, missing energy, and visible energy distributions in the CMS frame.

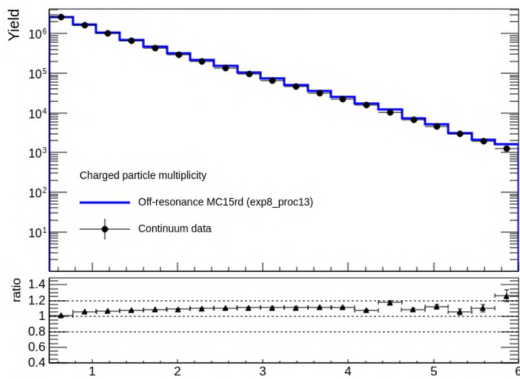


Figure 4: Charged particle multiplicity before tuning.

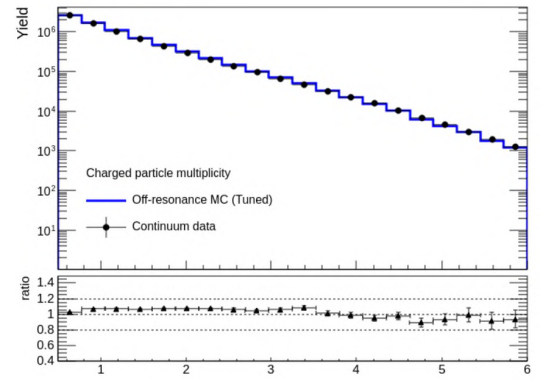


Figure 5: Charged particle multiplicity after tuning.

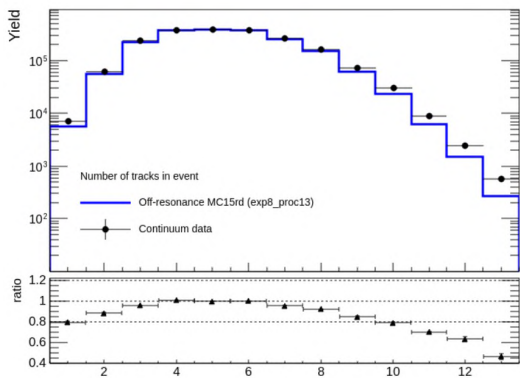


Figure 6: Number of tracks per event before tuning.

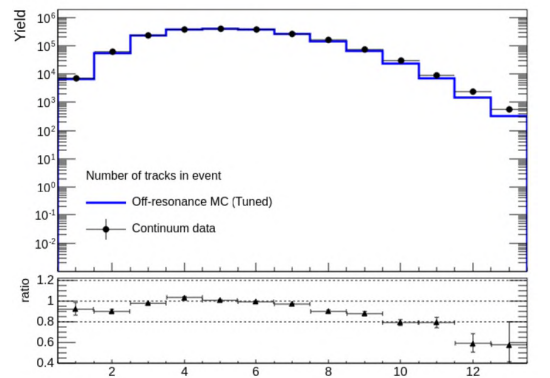


Figure 7: Number of tracks per event after tuning.

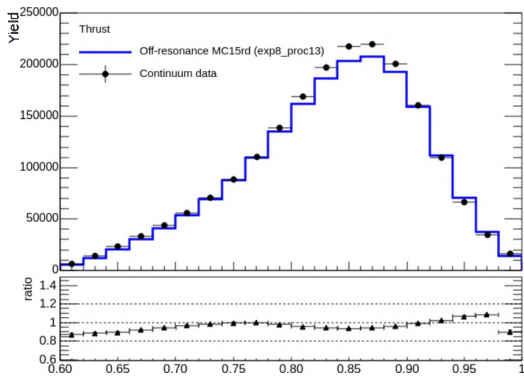


Figure 8: Thrust distribution before tuning.

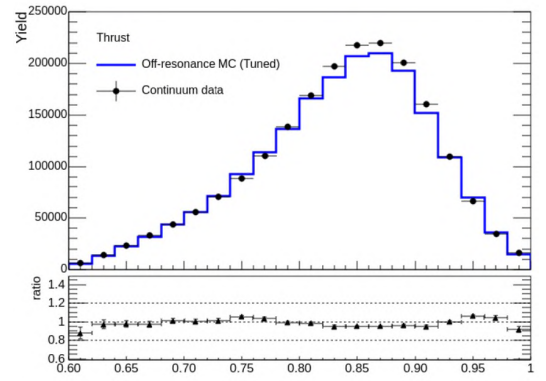


Figure 9: Thrust distribution after tuning.

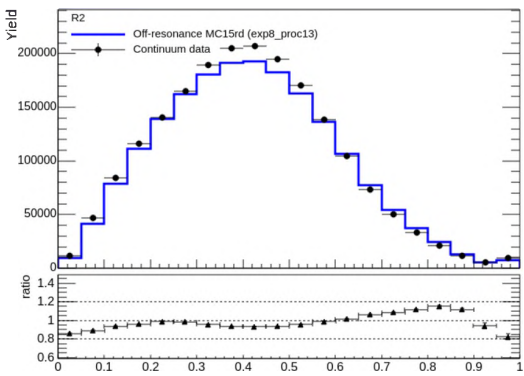


Figure 10: R_2 distribution before tuning.

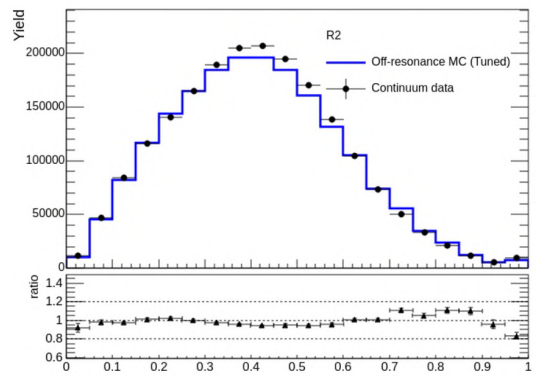


Figure 11: R_2 distribution after tuning.

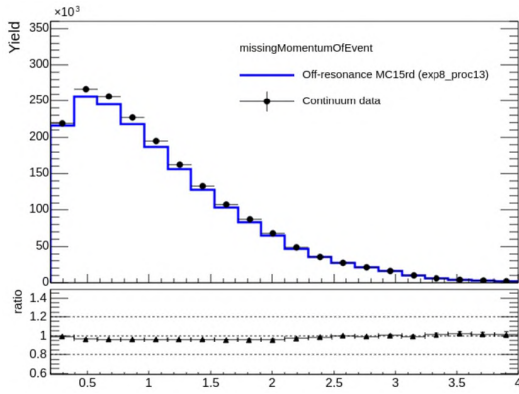


Figure 12:
MissingMomentumOfEvent
distribution before tuning.

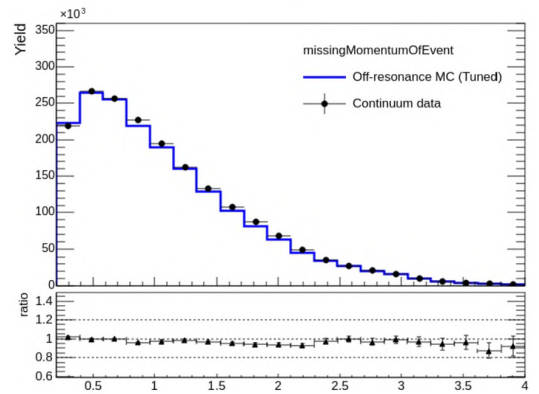


Figure 13:
MissingMomentumOfEvent
distribution after tuning.

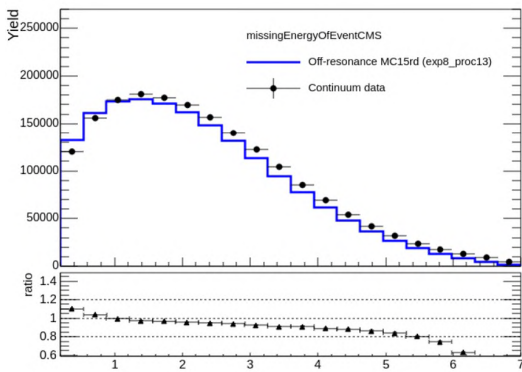


Figure 14:
MissingEnergyOfEventCMS
distribution before tuning.

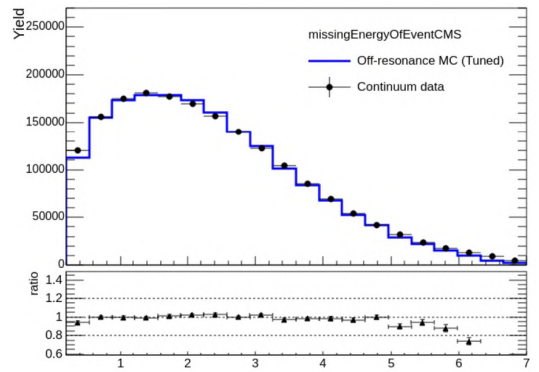


Figure 15:
MissingEnergyOfEventCMS
distribution after tuning.

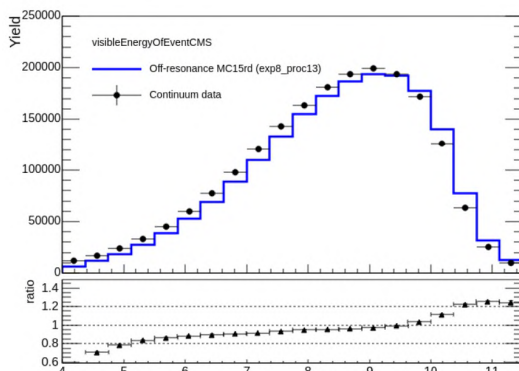


Figure 16:
VisibleEnergyOfEventCMS
distribution before tuning.

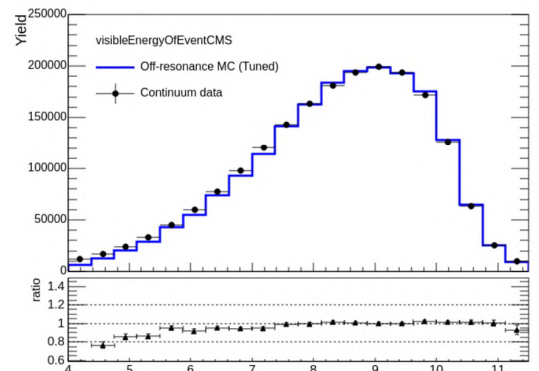


Figure 17:
VisibleEnergyOfEventCMS
distribution after tuning.

This comprehensive tuning procedure highlights the effectiveness of the

optimized parameters in improving the fidelity of Monte Carlo simulations for continuum event characteristics in the Belle II experiment.

Conclusion

The tuning process for the off-resonance Monte Carlo (MC) simulations has significantly improved the agreement with experimental continuum data across key observables such as Thrust, Fox-Wolfram moment, charged particle multiplicity, and track numbers per event. Additionally, the tuning effectively aligned visible and missing energy distributions with experimental results, demonstrating consistent improvements across the energy spectrum. Validation comparisons with experimental data across multiple key observables indicated that the newly tuned MC parameters better reproduced the shapes and distributions than previous settings, confirming the tuning's robustness and reliability. While the tuning process has proven successful for off-resonance data, future work is needed to refine parameters for on-resonance scenarios, as certain resonance-sensitive observables did not show similar improvements. Collaborative validation efforts underline the necessity of tailoring tuning procedures to the specific datasets, emphasizing the complexity of optimizing Monte Carlo simulations for different experimental conditions.

Author's relevant published papers

- H. Ghumaryan,
Pythia8 MC Tuning Validation Using the Professor2 Package,
Mathematical Problems of Computer Science 2024,
DOI: <https://doi.org/10.51408/1963-0112>.
- I. Adachi, L. Aggarwal, H. Aihara, N. Akopov, ..., H. Ghumaryan,
Measurement of CP asymmetries and branching-fraction ratios for $B^\pm \rightarrow DK^\pm$ and $D\pi^\pm$ with $D \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ using Belle and Belle II data,
JHEP 09 (2023) 146,
DOI: [10.1007/JHEP09\(2023\)146](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2023)146).
- I. Adachi, L. Aggarwal, H. Aihara, N. Akopov, ..., H. Ghumaryan,
Precise Measurement of the D_s^+ Lifetime at Belle II,
Phys. Rev. Lett. 131, 171803 (2023),
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.171803>.
- I. Adachi, L. Aggarwal, H. Aihara, N. Akopov, ..., H. Ghumaryan,
Measurement of branching fractions and direct CP asymmetries for $B \rightarrow K\pi$ and $B \rightarrow \pi\pi$ decays at Belle II,
Phys. Rev. D, 2024,
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.109.012001>.

Bibliography

- [1] Torbjorn Sjostrand, Stephen Mrenna, and Peter Z. Skands. “A Brief Introduction to PYTHIA 8.1”. In: *Comput. Phys. Commun.* (2008). URL: <https://pythia.org/>.
- [2] W. Altmannshofer et al. “The Belle II Physics Book”. In: *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2019).
- [3] Peter Skands, Stefan Carrazza, and Jon Rojo. “Tuning PYTHIA 8.1: the Monash 2013 tune”. In: *Eur. Phys. J. C* 74 (2014), p. 3024. URL: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-014-3024-y>.
- [4] Professor Collaboration. *Professor: A Framework for Event Generator Tuning*. URL: <https://professor.hepforge.org/downloads/>.
- [5] F. J. Massey Jr. *The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit*. Journal of the American Statistical Association, 1951.
- [6] CERN. *The Worldwide LHC Computing Grid (WLCG)*. [Online]. URL: <https://home.cern/science/computing/grid/>.
- [7] T. Sjöstrand and L. Lönnblad. *PYTHIA 6.2: Physics and Manual*. Department of Theoretical Physics, Lund University.
- [8] M. G. Hazaravard. *Pythia8 MC Tuning Validation Using the Professor2 Package*. Mathematical Problems of Computer Science. DOI: <https://doi.org/10.51408/1963-0112>.

PYTHIA8 Մոնտե Կառլո գեներատորի պարամետրերի կարգաբերումը (tuning) Բեյլե 2 գիտափորձի համար

Ամփոփագիր

Այս ատենախոսությունը նվիրված է Pythia8 Մոնտե Կառլո պատահարների գեներատորի կարգաբերմանը Belle II գիտափորձի համար, որն անհրաժեշտ է SuperKEKB արագացուցիչում իրականացվող բարձր էներգիական մասնիկների բախումների ճշգրիտ սիմուլյացիաների ստեղծման համար: Pythia8-ը կարևոր գործիք է պրոցեսների մոդելավորման համար, ինչպիսիք են՝ հադրոնիզացիան և պարտոնային փոխազդեցությունները: Սակայն, այս սիմուլյացիաների ճշգրտությունը կախված է այդ մոդելներում առկա ազատ պարամետրերի արժեքներից, որպեսզի դրանց օգտագործմամբ Մոնտե Կառլո սիմուլյացիաները նկարագրեն փորձարարական տվյալները: Աշխատանքում կարգաբերման գործընթացն իրականացվել է Professor2 փաթեթի միջոցով, որն օգտագործվում է բազմապարամետրային օպտիմալացման համար: Այս գործընթացը ներառում է պարամետրերի զգայունության վերլուծություն՝ առավել զգայուն պարամետրերին առաջնահերթություն տալու համար: Արդյունքում նվազեցվել են փորձարարական և գեներացված տվյալների անհամապատասխանությունները՝ ապահովելով Pythia8 գեներատորի առավել հուսալի աշխատանքը: Ատենախոսության հիմնական նպատակն է որոշել նվազագույն պարամետրերի խումբ, որն անհրաժեշտ է հադրոնների առաջացման գործընթացի (հադրոնիզացիայի) ճշգրիտ նկարագրման համար՝ Belle II միջազգային համագործակցության տվյալների հիման վրա: Պարամետրերի ցանկը նվազեցնելու միջոցով հնարավոր է խուսափել բազմապարամետրային օպտիմալացման բարդություններից, որոնք առաջանում են պարամետրերի փոխկապակցվածությունից: Աշխատանքը ներառում է մի շարք նորարարական մոտեցումներ՝ Pythia8 գեներատորի կարգաբերման համատեքստում:

- Բազմապարամետրային օպտիմալացման գործիքակազմի կիրառում Professor2 փաթեթի միջոցով իրականացվել է պարամետրերի տարածության օպտիմալ ուսումնասիրություն:
- Համապարփակ զգայունության վերլուծություն՝ Pythia8-ի պարամետրերի ազդեցության մանրամասն ուսումնասիրություն, որն ապահովում է կարգաբերման առավելագույն արդյունավետությունը:

Ատենախոսությունը բաղկացած է 7 գլխից ներառյալ ներածությունը և եզրակացությունը: Ընդհանուր աշխատանքը ներառում է 108 էջ, 16 աղյուսակ և 152 գրաֆիկ:

Գլուխ 1-ում ներածության հիմնական բաղադրիչներն են՝

- Belle II փորձի նկարագիրը և դրա դերը մասնիկների ֆիզիկայի զարգացման մեջ:
- Մոնտե Կառլո սիմուլյացիաների կարևորությունը փորձարարական տվյալների վերլուծության համար:
- Pythia8 գեներատորի կարգաբերման անհրաժեշտությունը փորձարարական տվյալներին համապատասխանեցնելու համար:
- Professor2 փաթեթի կիրառումը կարգաբերման գործընթացում:

- Աշխատանքի գիտական և գործնական նշանակությունը՝ հազվագյուտ երևույթների ուսումնասիրության համատեքստում:

Գլուխ 2-ում ներկայացվում է Belle II գիտափորձի կառուցվածքը՝ SuperKEKB արագացուցչից մինչև դետեկտորների հիմնական բաղադրիչները (VXD, CDC, TOP դետեկտոր, ARICH, KLM և այլն) և ծրագրային շրջանակը:

Գլուխ 3-ը մանրամասն նկարագրում է Pythia8 Մոնտե Կառլո գեներատորը, դրա կարգաբերումների, հադրոնացման և Lund String մոդելի կիրառությունը:

Գլուխ 4-ում ներկայացված է կարգաբերման գործընթացը Professor2-ի միջոցով, զգայունության ստուգումներն ու պարամետրերի օպտիմալացումը: Տարբեր կարգաբերումների համար օգտագործվում են 2D գծապատկերներ, մոդելի համեմատություններ և կարգաբերման համար կարևոր փոփոխականներ:

Գլուխ 5-ը կենտրոնանում է տվյալների հավաքագրման, ընտրության և Pythia6 և Pythia8 գեներատորների համեմատության վրա:

Գլուխ 6-ում ներկայացվում է կարգաբերված և փորձարարական տվյալների համեմատությունը:

Այս արդյունքները հաստատում են, որ ճշգրտված պարամետրերը զգալիորեն բարձրացնում են սիմուլյացիայի համապատասխանությունը փորձարարական տվյալներին, կարևոր հիմք դնելով հետագա վերլուծությունների և ռեզոնանսային դեպքերի ճշգրտումների համար:

Настройка (tuning) параметров генератора событий Monte Carlo PYTHIA8 для эксперимента Belle II.

Резюме

Диссертация посвящена настройке параметров Monte Carlo генератора событий Pythia8 для проведения точных симуляций высокоэнергетических столкновений частиц на ускорителе SuperKEKB. Pythia8 играет важную роль в моделировании процессов, таких как адронизация и взаимодействия партона. Однако точность симуляций зависит от настройки параметров генератора для соответствия экспериментальным данным.

Процесс настройки выполнен с использованием пакета Professor2, который применяется для многопараметрической оптимизации. Настройка включала анализ чувствительности параметров, что позволило определить наиболее значимые параметры и уменьшить расхождения между экспериментальными данными и результатами симуляций, обеспечив более надежную работу генератора Pythia8.

Основные цели работы

1. Определение минимального набора параметров, необходимых для точного описания процесса адронизации.
2. Сокращение списка параметров с целью предотвращения сложностей многопараметрической оптимизации из-за их корреляции.

Научная новизна

1. Применение Professor2 для оптимизации параметров, что обеспечило более эффективное исследование пространства параметров.
2. Анализ чувствительности параметров Pythia8, что позволило выявить их влияние на точность симуляций.

Диссертация состоит из 7 глав, включая введение и заключение. Общий объем работы — 108 страниц, включающих 16 таблиц и 152 графика.

- Глава 2 описывает эксперимент Belle II и его основные компоненты, включая ускоритель SuperKEKB, детекторы (VXD, CDC, TOP, ARICH, KLM) и программное обеспечение.
- Глава 3 подробно рассматривает генератор Pythia8, включая процесс адронизации и применение модели Lund String.
- Глава 4 посвящена процессу настройки с использованием Professor2, включая проверку чувствительности параметров, их оптимизацию и анализ ключевых наблюдаемых величин.
- Глава 5 концентрируется на сравнении данных генераторов Pythia6 и Pythia8, а также на анализе собранных данных.
- Глава 6 представляет сравнительный анализ данных симуляции и экспериментальных данных, подтверждая улучшение соответствия после настройки.

Результаты настройки показали, что откалиброванные параметры генератора Pythia8 значительно повысили точность симуляций нерезонансных событий, что создает основу для дальнейших исследований, включая настройку для резонансных процессов.