

З. А. Нассер, І. Ф. Хусейн*, А. А. Аль-Рубаї

Університет Мустансірія, Коледж наук, Фізичний факультет, Багдад, Ірак

*Відповідальний автор: itabfadhil@uomustansiriyah.edu.iq

ПОЗДОВЖНИЙ РОЗВИТОК ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ В ШИРОКІЙ АТМОСФЕРНІЙ ЗЛИВІ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ ОБЛАСТІ «КОЛІНА» ТА «ГОМІЛКИ»

Виявлення поздовжнього профілю широких атмосферних злив (EAS) має вирішальне значення для дослідження походження та характеристик космічних променів надвисокої енергії. У цьому дослідженні моделюється EAS, індукований гамма-випромінюванням у діапазонах енергії 10^{15} eV («коліно») та 10^{18} - 10^{20} eV («гомилка») за допомогою пакету AIR-shower Extended Simulations (AIRES) (версія 19.04.10) з адронними моделями QGSJET-II-04 та EPOS-LHC при зенітних кутах 0° та 25° . Амплітуда зливи параметризована за допомогою Гауссіана. Виявляється, що максимум зливи $X_{\max}$ розвивається логарифмічно як функція початкової енергії. Густина гамма-променів досягає піка у глибших шарах атмосфери ~ 580 - 864 г/см² для вищих енергій. Зокрема, похилі зливи 25° демонструють ширший розподіл частинок завдяки більшій довжині шляху в атмосфері, що узгоджується з результатами від CORSIKA. Отримані висновки обмежують моделі взаємодії для експериментів Cherenkov Telescope Array і LHAASO, тим самим зменшуючи систематичні помилки в аналізі складу космічних променів.

Ключові слова: гамма-випромінювання, поздовжній розвиток, система AIRES, області «коліна» та «гомилки», широка атмосферна злива.

Z. A. Nasser, I. F. Hussein*, A. A. Al-Rubaiee

Mustansiriyah University, College of Science, Department of Physics, Baghdad, Iraq

*Corresponding author: itabfadhil@uomustansiriyah.edu.iq

LONGITUDINAL DEVELOPMENT OF GAMMA-RAY EXTENSIVE AIR SHOWER IN THE KNEE AND ANKLE ENERGY RANGES

Identifying the longitudinal profile of extensive air showers (EAS) is crucial for investigating the origin and characteristics of ultra-high-energy cosmic rays. This study simulates gamma-ray-induced EAS in the knee 10^{15} eV and ankle 10^{18} - 10^{20} eV energy ranges using the AIR-shower Extended Simulations (AIRES) system (Version 19.04.10) with QGSJET-II-04 and EPOS-LHC hadronic models at zenith angles of 0° and 25° . The shower patterns are parameterized using a Gaussian amplitude function, which reveals that the shower maximum $X_{\max}$ develops logarithmically with primary energy. Gamma-ray density peaks in deeper atmospheric layers ~ 580 - 864 g/cm² for higher energies. Particularly, slanted showers 25° display wider particle distributions due to longer atmospheric path lengths, which is consistent with CORSIKA. These findings limit the harmonic interaction models for the Telescope Array and LHAASO experiments, thereby reducing systematic errors in cosmic ray composition analysis.

Keywords: gamma-ray, longitudinal development, AIRES system, knee and ankle regions, extensive air shower.

REFERENCES

1. J.A. Simpson. Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **33** (1983) 323.
2. S. Knurenko et al. Cerenkov radiation of cosmic ray extensive air showers. Part 3. Longitudinal development of showers in the energy region of 10^{15} - 10^{17} eV. In: *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 07 - 15 August 2001*, p. 157.
3. K.-H. Kampert. Methods of determination of the energy and mass of primary cosmic ray particles at extensive air shower energies. *J. Phys. G* **27** (2001) 1663.
4. E. Fermi. On the origin of the cosmic radiation. *Phys. Rev.* **75** (1949) 1169.
5. B. Peters. Primary cosmic radiation and extensive air showers. *Nuovo Cim.* **22** (1961) 800.
6. L.J. Schultz. Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography. *Nucl. Instrum. Methods A* **519** (2004) 687.
7. W. Heitler. *The Quantum Theory of Radiation*. 3rd ed. (London: Oxford University Press, 1954) p. 386.
8. E.-J. Ahn et al. Cosmic ray event generator Sibyll 2.1. *Phys. Rev. D* **80** (2009) 094003.
9. P.K.F. Grieder. *Extensive Air Showers. High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects – A Tutorial, Reference Manual and Data Book* (Berlin: Springer-Verlag, 2010).

10. A. Acharyya et al. VTSCat: The VERITAS catalog of gamma-ray observations. [Res. Notes Am. Astron. Soc. 7 \(2023\) 6](#).
11. F. Zhang et al. Study of the longitudinal development of air showers in the knee energy range. [Astropart. Phys. 152 \(2023\) 102877](#).
12. M. Risse et al. Primary particle type of the most energetic Fly's Eye air shower. [Astropar. Phys. 21\(4\) \(2004\) 479](#).
13. J.A. Hinton (For the HESS Collaboration). The status of the HESS project. [New Astron. Rev. 48\(5-6\) \(2004\) 331](#).
14. Z. Cao (on behalf of LHAASO Collaboration). LHAASO status and physics results. [EPJ Web Conf. 280 \(2023\) 01003](#).
15. A.A. Al-Rubaiee. Extension of Cherenkov Light LDF Parametrization for Tunka and Yakutsk EAS Arrays. [J. Astrophys. Astr. 35 \(2014\) 631](#).
16. V. Verzi, D. Ivanov, Y. Tsunesada. Measurement of energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays. [Prog. Theor. Exp. Phys. 12 \(2017\) 12A103](#).
17. W. Hofmann, R. Zanin. The Cherenkov Telescope Array. [arXiv:2305.12888 \(2023\)](#).
18. W. Heitler. Theory of Meson Production. [Rev. Mod. Phys. 21 \(1949\) 113](#).
19. K.-H. Kampert, A.A. Watson. Extensive air showers and ultra high-energy cosmic rays: a historical review. [Eur. Phys. J. H 37 \(2012\) 359](#).
20. [Cosmic-rays air showers](#).
21. A. Haungs, H. Rebel, M. Roth. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays. [Rep. Prog. Phys. 66 \(2003\) 1145](#).
22. S.J. Sciutto. *AIRES User's Manual and Reference Guide (Version 19.04.10)* (Argentina, La Plata, 2023) 240 p.
23. H. Rebel, O. Sima. Information about high-energy hadronic interaction processes from extensive air shower observations. [Rom. J. Phys. 57\(1-2\) \(2012\) 472](#).
24. W. Heitler. Cascade Showers. In: *Quantum Theory of Radiation*. 2nd ed. Chapter 5 (Oxford University Press, 1944) p. 232.
25. S.J. Sciutto. The AIRES system for air shower simulations. An update. [arXiv:astro-ph/0106044v1 \(2001\)](#).
26. I.F. Hussein, A.A. Al-Rubaiee. Estimating the longitudinal development of atmospheric cascades at high energies. [AIP Conf. Proc. 2591 \(2023\) 030072](#).
27. T.Z. Abuzayyad. The energy spectrum of ultra high energy cosmic rays. PhD Thesis (University of Utah, 2000) 138 p.
28. I.F. Hussein, A.A. Al-Rubaiee. Simulating and modelling the extensive air showers development through the estimating the energy of some created particles. [Al-Mustansiriyah J. Sci. 33\(3\) \(2022\) 1137](#).
29. The Pierre Auger Collaboration. The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. [Nucl. Instrum. Methods A 798 \(2015\) 172](#).
30. M. Takeda et al. Extension of the cosmic-ray energy spectrum beyond the predicted Greisen-Zatsepin-Kuz'min cutoff. [Phys. Rev. Lett. 81\(7\) \(1998\) 1163](#).
31. D. Heck et al. *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers* (Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998) 90 p.

Надійшла / Received 21.01.2025