



Supplementary Materials for

An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array

Telescope Array Collaboration

Corresponding author: Toshihiro Fujii, toshi@omu.ac.jp

Science **382**, 903 (2023)
DOI: 10.1126/science.abo5095

The PDF file includes:

Telescope Array Collaboration Authors
Materials and Methods
Supplementary Text
Figs. S1 to S3
References

Telescope Array Collaboration Authors and Affiliations

R.U. Abbasi¹, M.G. Allen², R. Arimura³, J.W. Belz², D.R. Bergman², S.A. Blake⁴, B.K. Shin⁵, I.J. Buckland², B.G. Cheon⁶, T. Fujii^{7,3,8*}, K. Fujisue⁹, K. Fujita⁹, M. Fukushima⁹, G.D. Furlich², Z.R. Gerber², N. Globus^{10,‡}, K. Hibino¹¹, R. Higuchi¹⁰, K. Honda¹², D. Ikeda¹¹, H. Ito¹⁰, A. Iwasaki³, S. Jeong¹³, H.M. Jeong¹³, C.H. Jui², K. Kadota¹⁴, F. Kakimoto¹¹, O.E. Kalashev¹⁵, K. Kasahara¹⁶, K. Kawata⁹, I. Kharuk¹⁵, E. Kido¹⁰, S.W. Kim¹³, H.B. Kim⁶, J.H. Kim², J.H. Kim¹⁷, I. Komae³, Y. Kubota¹⁸, M. Yu. Kuznetsov¹⁵, K.H. Lee¹³, B.K. Lubsandorzhiev¹⁵, J.P. Lundquist¹⁹, J.N. Matthews², S. Nagataki¹⁰, T. Nakamura¹⁸, A. Nakazawa¹⁸, T. Nonaka⁹, S. Ogio⁹, M. Ono^{20,10}, H. Oshima⁹, I.H. Park¹³, M. Potts², S. Pshirkov¹⁵, J.R. Remington²¹, D.C. Rodriguez^{22,2}, C. Rott^{2,13}, G.I. Rubtsov¹⁵, D. Ryu⁵, H. Sagawa⁹, N. Sakaki¹⁰, T. Sako⁹, N. Sakurai²³, H. Shin⁹, J.D. Smith², P. Sokolsky², B.T. Stokes², T.S. Stroman², K. Takahashi⁹, M. Takeda⁹, A. Taketa²⁴, Y. Tameda²⁵, S. Thomas², G.B. Thomson², P.G. Tinyakov²⁶, I. Tkachev¹⁵, T. Tomida¹⁸, S.V. Troitsky¹⁵, Y. Tsunesada^{3,8}, S. Udo¹¹, F.R. Urban²⁷, T. Wong², K. Yamazaki²⁸, Y. Yuma¹⁸, Y.V. Zhezher¹⁵ and Z. Zundel²

¹ Physics Department, Loyola University Chicago, Chicago, IL, USA

² High Energy Astrophysics Institute and Department of Physics and Astronomy, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112-0830, USA

³ Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi, Osaka, 558-8585, Japan

⁴ Stellar Science, Albuquerque, New Mexico, 87110, USA

⁵ Department of Physics, Ulsan National Institute of Science and Technology, 44919, Ulsan, Korea

⁶ Department of Physics and The Research Institute of Natural Science, Hanyang University,

Seongdong-gu, Seoul, Korea

⁷ Hakubi Center for Advanced Research and Graduate School of Science, Kyoto University, Sakyo, Kyoto, 606-8502, Japan

⁸ Nambu Yoichiro Institute of Theoretical and Experimental Physics, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi, Osaka, 558-8585, Japan

⁹ Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8582, Japan

¹⁰ Institute of Physical and Chemical Research, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198 Japan

¹¹ Faculty of Engineering, Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama 221-8686, Japan

¹² University of Yamanashi, Kofu, 400-8510, Japan

¹³ Department of Physics, SungKyunKwan University, Jang-an-gu, Suwon 16419, Korea

¹⁴ Department of Natural Sciences, Tokyo City University, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557, Japan

¹⁵ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, prospekt 60-letiya Otkryabrya 7a, Moscow 117312, Russia

¹⁶ Shibaura Institute of Technology and Science, Fukasaku 307, Minuma-ku, Saitama, Japan

¹⁷ Physics Division, Argonne National Laboratory, Lemont, Illinois 60439, USA

¹⁸ Academic Assembly School of Science and Technology Institute of Engineering, Shinshu University, Nagano, Nagano, 380-8553, Japan

¹⁹ Center for Astrophysics and Cosmology, University of Nova Gorica, Nova Gorica, Slovenia

²⁰ Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, Taipei 10617, Taiwan

²¹ NASA Marshall Space Flight Center, Martin Road, Huntsville, AL 35808, USA

²² Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation and Nuclear Security, Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Ibaraki 319-1195, Japan

²³ Faculty of Design Technology, 3-1-1 Nakagaito, Daito City, Osaka, Japan

²⁴ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032, Japan

²⁵ Department of Engineering Science, Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, Neyagawa-shi, Osaka 572-8530, Japan

²⁶ Universite Libre de Bruxelles, bvd du Triomphe CP225, Brussels, Belgium

²⁷ The Central European Institute for Cosmology and Fundamental Physics, Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences, Na Slovance 1999/2, 182 21 Prague, Czech Republic

²⁸ College of Engineering, Chubu University, 1200 Matsumoto, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

‡ Present address: Department of Astronomy and Astrophysics, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA

* E-mail: toshi@omu.ac.jp

Materials and Methods

Analysis Procedure and Energy Reconstruction

The TA SD consists of 507 plastic scintillators to measure charged particle densities of extensive air showers on the ground. The measured signal waveform shown in Figure 1 are integrated to calculate the particle densities. The lateral density distribution, $\rho(r)$, is estimated by fitting the recorded particle densities with the model:

$$\rho(r) = A \left(\frac{r}{r_M} \right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{r}{r_M} \right)^{-(\eta(\theta)-\alpha)} \left[1 + \left(\frac{r}{1000} \right)^2 \right]^{-\beta} \quad (S1)$$

$$\eta(\theta) = 3.97 - 1.79 (\sec(\theta) - 1) \quad (S2)$$

where r is the distance from shower axis, θ is the zenith angle of the shower axis and A is a free parameter. The TA SD pipeline assumes a parameterization of $\alpha = 1.2$, $\beta = 0.6$ and the Moliere unit $r_M = 91.6$ m (44). Figure S1 shows the lateral density distribution and fitted model for the 2021 May 27 event. As an energy estimator, we used the particle density at a distance of 800 m from the shower axis, S_{800} , to minimize an effect of the dependence on mass composition. The primary energy of the shower is evaluated from S_{800} and $\sec(\theta)$ by a lookup table derived from a shower simulation (18) assuming a proton and the quark-gluon string (QGS) Jet-II-03 hadronic interaction model (12). We find the primary energy of the shower on 2021 May 27 is 309 EeV. This energy is multiplied by a factor of 1/1.27 to use the calorimetric energy determination by fluorescence detectors, resulting in 244 EeV. Figure S2 shows an energy scale comparison between the fluorescence detector reconstructed energies (16) and the reconstructed SD energies after applying the 1/1.27 rescaling for the 9 years data set. No energy dependence of the scaling factor is evident.

The reconstructed energy of TA SD to reproduce $S_{800} = 530 \text{ m}^{-2}$ listed in Table 1, assuming a proton and QGSJetII-03 is 309 EeV. To investigate uncertainties related to primary species and interaction models, we evaluate energies for both proton and iron primaries using the models

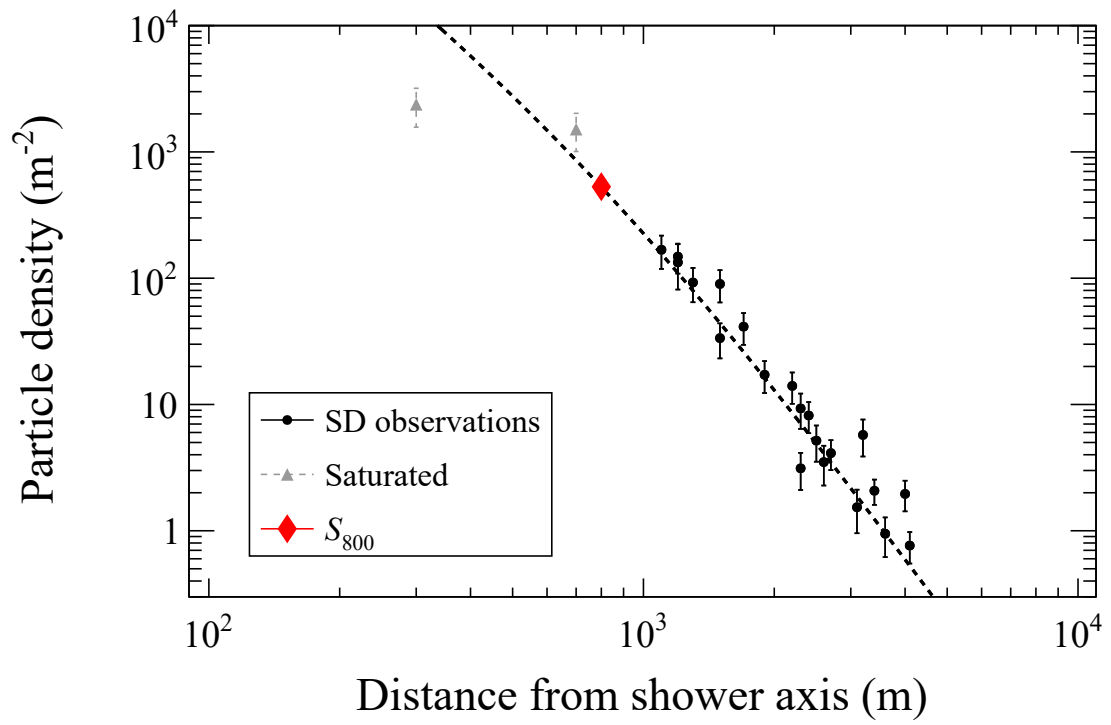


Figure S1: **Lateral density distribution and fitted model for the event on 2021 May 27.** The gray triangles are excluded from the fitting due to signal saturation. The red diamond shows the S_{800} energy estimator.

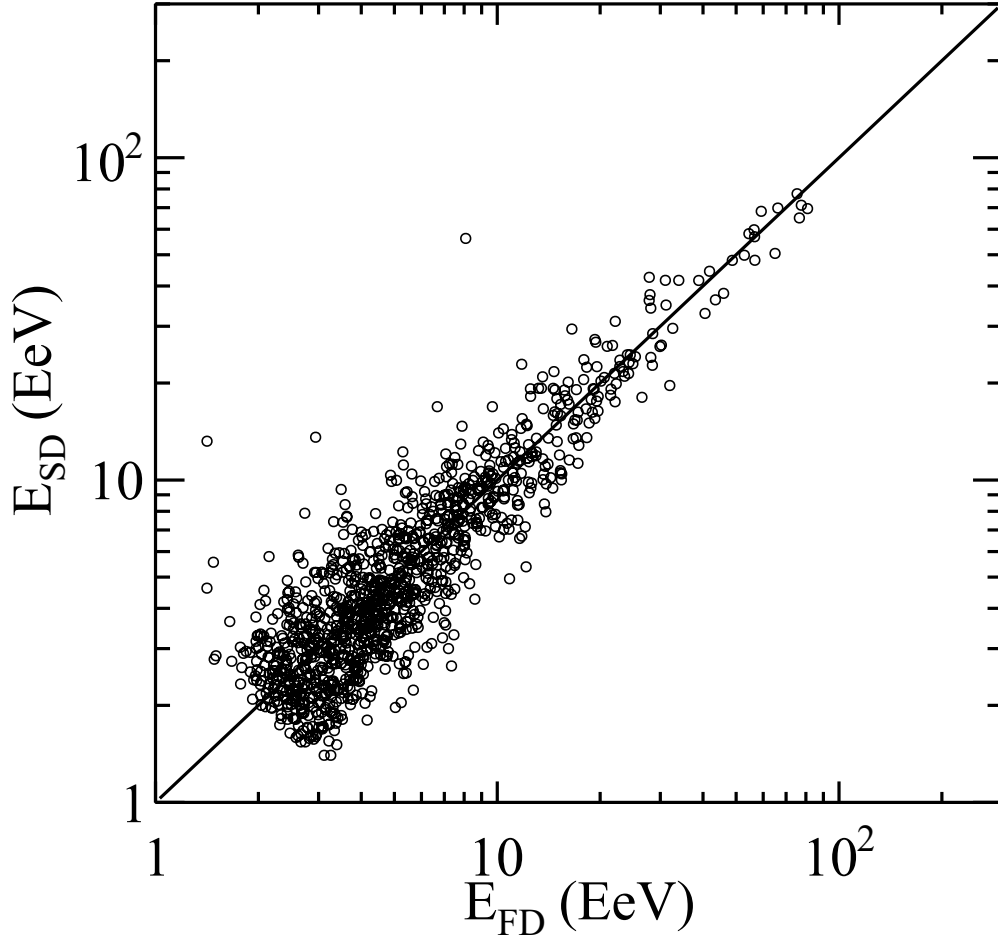


Figure S2: **Energy comparison between the fluorescence detector reconstruction (16), E_{FD} and our adopted SD reconstruction, E_{SD} , with a 1/1.27 rescaling, for a 9 years data set.**

of QGSJet-II-04 (45) and EPOS-LHC (46) to reproduce the measured S_{800} of 530 m^{-2} . EPOS is an acronym for the Energy conserving quantum mechanical approach, based on Partons, parton ladders, strings, Off-shell remnants, and Splitting of parton ladders. These energies yield: in the QGSJetII-04 model, 300 EeV for proton and 272 EeV for iron; in the EPOS-LHC model, 261 EeV for proton and 240 EeV for iron. From this difference between proton and iron primaries, we infer the additional -10% systematic uncertainty specified in the main text. If a different species or interaction model is assumed, the energy scale remains unchanged because we adopted the calorimetric energy calibrated by the fluorescence detectors so this difference is compensated by the calibration factor.

Supplementary Text

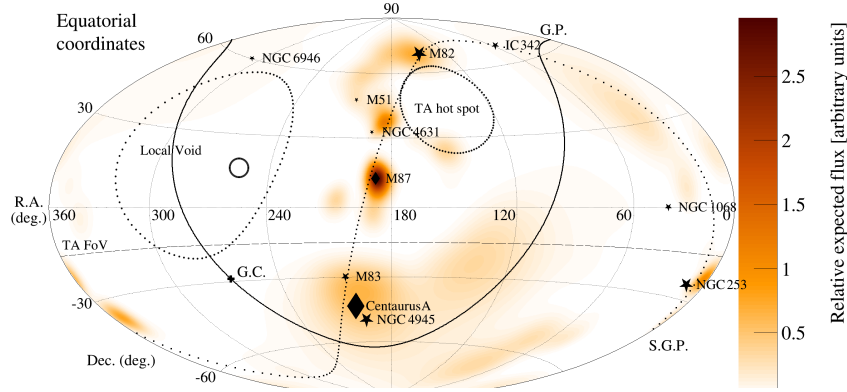
Expected cosmic ray sources

We investigated how the expected LSS flux distribution changes if the energy of the event was varied within its uncertainty. In Fig. S3 we show flux maps for energies 244 EeV, 186 EeV and 135 EeV, the latter two energies being $-2\sigma_{\text{stat.}}$ and $-2\sigma_{\text{stat.}} - \sigma_{\text{syst.}}$ (without the systematic uncertainty on primary species), where $\sigma_{\text{stat.}}$ is the statistical uncertainty and $\sigma_{\text{syst.}}$ is the systematic uncertainty. The injection spectrum for iron is set to $E^{-1.95}$ with a sharp cutoff at 560 EeV, adopted from a model fitted to the TA observed spectrum (47). At low energies, the event is unlikely to correlate with LSS sources. Only by assuming the lower energy by including systematic uncertainty, and an iron primary, does the regular GMF backtracked direction fall close to a part of LSS populated by galaxies. This is consistent with previous studies that found no correlation between events >100 EeV and the local LSS (48, 49).

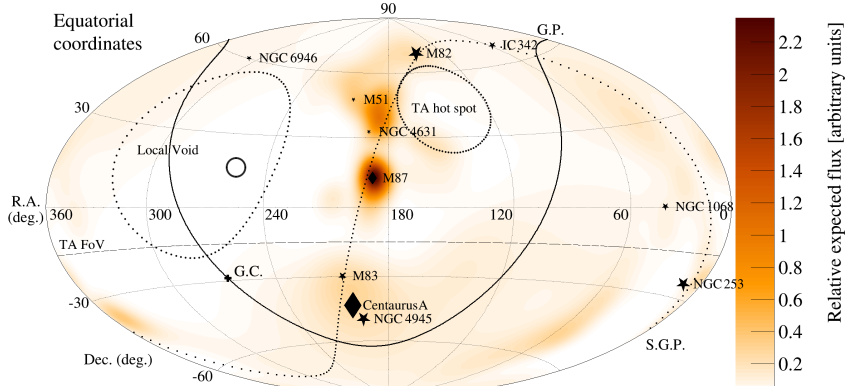
We estimated the distance to the closest UHECR source by integrating the energy loss length of a given primary from the energy 244 EeV to an assumed injection energy E_0 . We assume $E_0 = 10^3$ EeV, compute the energy loss length with the TransportCR software (42) and calculate

Fig. S3

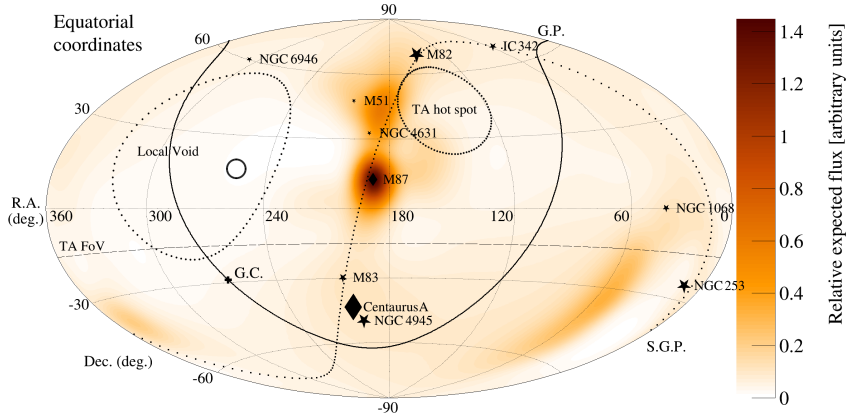
8

**Fig. S3**

9

**Fig. S3**

10



(C) 135 EeV

Figure S3: **The relative expected flux at lower energies.** The background and other symbols are the same as Fig. 2 but the expected flux is calculated for energies: (A) 244 EeV, (B) 186 EeV and (C) 135 EeV, see text for details.

$D_0 = 10.3^{+5.3}_{-3.0}$ Mpc and $D_0 = 27.0^{+3.8}_{-3.0}$ Mpc for iron and proton primaries respectively, where the uncertainties in D_0 are propagated from the statistical uncertainty in particle energy. The corresponding 95% C.L. upper bounds are $D_0 < 25.5$ Mpc and $D_0 < 36.0$ Mpc for iron and proton respectively. There are several uncertainties affecting this result. First, the energy scale systematic leads to a wider uncertainty: $D_0 = 10.3^{+25.2}_{-4.5}$ Mpc for iron and $D_0 = 27.0^{+7.6}_{-4.9}$ Mpc for protons. Second, assuming higher injection energy, $E_0 = 10^4$ EeV would only slightly impact the result for iron: $D_0 = 13.1^{+5.3}_{-3.0}$ Mpc, while substantially impact the result for protons: $D_0 = 61.9^{+3.8}_{-3.0}$ Mpc, though the proton scenario is disfavored (see main text). Thirdly, we recomputed the energy loss length using the SimProp code (50), finding it changes these results by approximately 10%.

References and Notes

1. A. M. Hillas, The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **22**, 425–444 (1984). [doi:10.1146/annurev.aa.22.090184.002233](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.22.090184.002233)
2. P. Bhattacharjee, G. Sigl, Origin and propagation of extremely high-energy cosmic rays. *Phys. Rep.* **327**, 109–247 (2000). [doi:10.1016/S0370-1573\(99\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(99)00101-5)
3. F. W. Stecker, S. T. Scully, Searching for new physics with ultrahigh energy cosmic rays. *New J. Phys.* **11**, 085003 (2009). [doi:10.1088/1367-2630/11/8/085003](https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/8/085003)
4. V. Berezhinsky, M. Kachelriess, A. Vilenkin, Ultrahigh Energy Cosmic Rays without Greisen-Zatsepin-Kuzmin Cutoff. *Phys. Rev. Lett.* **79**, 4302–4305 (1997). [doi:10.1103/PhysRevLett.79.4302](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.4302)
5. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, A. di Matteo, T. Fujii, K. Fujita, M. Fukushima, G. Furlich, T. Goto, W. Hanlon, M. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D. Ivanov, H. M. Jeong, S. Jeong, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, S. Kishigami, S. Kitamura, Y. Kitamura, V. Kuzmin, M. Kuznetsov, Y. J. Kwon, K. H. Lee, B. Lubsandorzhiev, J. P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuyama, J. N. Matthews, R. Mayta, M. Minamino, K. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, R. Nakamura, T. Nakamura, T. Nonaka, H. Oda, S. Ogio, J. Ogura, M. Ohnishi, H. Ohoka, T. Okuda, Y. Omura, M. Ono, R. Onogi, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Piskunov, M. S. Pshirkov, J. Remington, D. C. Rodriguez, G. I. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, R. Sahara, K. Saito, Y. Saito, N. Sakaki, N. Sakurai, L. M. Scott, T. Seki, K. Sekino, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, H. S. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, T. Suzawa, Y. Takagi, Y. Takahashi, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, T. Wong, M. Yamamoto, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, Y. Zhezher, Z. Zundel, Constraints on the diffuse photon flux with energies above 10^{18} eV using the surface detector of the Telescope Array experiment. *Astropart. Phys.* **110**, 8–14 (2019). [doi:10.1016/j.astropartphys.2019.03.003](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2019.03.003)
6. P. Abreu, M. Aglietta, J. M. Albury, I. Allekotte, K. A. Cheminant, A. Almela, J. Alvarez-Muñiz, R. A. Batista, J. A. Yebra, G. A. Anastasi, L. Anchordoqui, B. Andrada, S. Andringa, C. Aramo, P. R. A. Ferreira, E. Arnone, J. C. A. Velázquez, H. Asorey, P. Assis, G. Avila, E. Avocone, A. M. Badescu, A. Bakalova, A. Balaceanu, F. Barbato, J. A. Bellido, C. Berat, M. E. Bertaina, G. Bhatta, P. L. Biermann, V. Binet, K. Bismark, T. Bister, J. Biteau, J. Blazek, C. Bleve, J. Blümer, M. Boháčová, D. Boncioli, C. Bonifazi, L. B. Arbeletche, N. Borodai, A. M. Botti, J. Brack, T. Bretz, P. G. B. Orcheria, F. L. Briechle, P. Buchholz, A. Bueno, S. Buitink, M. Buscemi, M. Büsken, K. S. Caballero-Mora, L. Caccianiga, F. Canfora, I. Caracas, R. Caruso, A. Castellina, F. Catalani, G. Cataldi, L. Cazon, M. Cerda, J. A. Chinellato, J. Chudoba, L. Chytka, R. W. Clay, A. C.

C. Cerutti, R. Colalillo, A. Coleman, M. R. Coluccia, R. Conceição, A. Condorelli, G. Consolati, F. Contreras, F. Convenga, D. C. dos Santos, C. E. Covault, S. Dasso, K. Daumiller, B. R. Dawson, J. A. Day, R. M. de Almeida, J. de Jesús, S. J. de Jong, J. R. T. de Mello Neto, I. De Mitri, J. de Oliveira, D. de Oliveira Franco, F. de Palma, V. de Souza, E. De Vito, A. Del Popolo, M. del Río, O. Deligny, L. Deval, A. di Matteo, M. Dobre, C. Dobrigkeit, J. C. D'Olivo, L. M. D. Mendes, R. C. dos Anjos, M. T. Dova, J. Ebr, R. Engel, I. Epicoco, M. Erdmann, C. O. Escobar, A. Etchegoyen, H. Falcke, J. Farmer, G. Farrar, A. C. Fauth, N. Fazzini, F. Feldbusch, F. Fenu, B. Fick, J. M. Figueira, A. Filipčič, T. Fitoussi, T. Fodran, T. Fujii, A. Fuster, C. Galea, C. Galelli, B. García, A. L. G. Vegas, H. Gemmeke, F. Gesualdi, A. Gherghel-Lascu, P. L. Ghia, U. Giaccari, M. Giammarchi, J. Glombitza, F. Gobbi, F. Gollan, G. Golup, M. G. Berisso, P. F. G. Vitale, J. P. Gongora, J. M. González, N. González, I. Goos, D. Góra, A. Gorgi, M. Gottowik, T. D. Grubb, F. Guarino, G. P. Guedes, E. Guido, S. Hahn, P. Hamal, M. R. Hampel, P. Hansen, D. Harari, V. M. Harvey, A. Haungs, T. Hebbeker, D. Heck, G. C. Hill, C. Hojvat, J. R. Hörandel, P. Horvath, M. Hrabovský, T. Huege, A. Insolita, P. G. Isar, P. Janecek, J. A. Johnsen, J. Jurysek, A. Kääpä, K. H. Kampert, B. Keilhauer, A. Khakurdikar, V. V. K. Covilakam, H. O. Klages, M. Kleifges, J. Kleinfeller, F. Knapp, N. Kunka, B. L. Lago, N. Langner, M. A. L. de Oliveira, V. Lenok, A. Letessier-Selvon, I. Lhenry-Yvon, D. L. Presti, L. Lopes, R. López, L. Lu, Q. Luce, J. P. Lundquist, A. M. Payeras, G. Mancarella, D. Mandat, B. C. Manning, J. Manshanden, P. Mantsch, S. Marafico, F. M. Mariani, A. G. Mariazzi, I. C. Mariş, G. Marsella, D. Martello, S. Martinelli, O. Martínez Bravo, M. Mastrodicasa, H. J. Mathes, J. Matthews, G. Matthiae, E. Mayotte, S. Mayotte, P. O. Mazur, G. Medina-Tanco, D. Melo, A. Menshikov, S. Michal, M. I. Micheletti, L. Miramonti, S. Mollerach, F. Montanet, L. Morejon, C. Morello, M. Mostafá, A. L. Müller, M. A. Muller, K. Mulrey, R. Mussa, M. Muzio, W. M. Namasaka, A. Nasr-Esfahani, L. Nellen, G. Nicora, M. Niculescu-Oglinzanu, M. Niechciol, D. Nitz, I. Norwood, D. Nosek, V. Novotny, L. Nožka, A. Nucita, L. A. Núñez, C. Oliveira, M. Palatka, J. Pallotta, P. Papenbreer, G. Parente, A. Parra, J. Pawlowsky, M. Pech, J. Pękala, R. Pelayo, J. Peña-Rodriguez, E. E. P. Martins, J. P. Armand, C. P. Bertolli, L. Perrone, S. Petrera, C. Petrucci, T. Pierog, M. Pimenta, V. Pirronello, M. Platino, B. Pont, M. Pothast, P. Privitera, M. Prouza, A. Puyleart, S. Querschfeld, J. Rautenberg, D. Ravignani, M. Reininghaus, J. Ridky, F. Riehn, M. Risse, V. Rizi, W. R. de Carvalho, J. R. Rojo, M. J. Roncoroni, S. Rossoni, M. Roth, E. Roulet, A. C. Rovero, P. Ruehl, A. Saftoiu, M. Saharan, F. Salamida, H. Salazar, G. Salina, J. D. S. Gomez, F. Sánchez, E. M. Santos, E. Santos, F. Sarazin, R. Sarmento, C. Sarmiento-Cano, R. Sato, P. Savina, C. M. Schäfer, V. Scherini, H. Schieler, M. Schimassek, M. Schimp, F. Schlüter, D. Schmidt, O. Scholten, H. Schoorlemmer, P. Schovánek, F. G. Schröder, J. Schulte, T. Schulz, S. J. Sciutto, M. Scornavacche, A. Segreto, S. Sehgal, R. C. Shellard, G. Sigl, G. Silli, O. Sima, R. Smayda, R. Šmída, P. Sommers, J. F. Soriano, R. Squartini, M. Stadelmaier, D. Stanca, S. Stanič, J. Stasielak, P. Stassi, A. Streich, M. Suárez-Durán, T. Sudholz, T. Suomijärvi, A. D. Supanitsky, Z. Szadkowski, A. Tapia, C. Taricco, C. Timmermans, O. Tkachenko, P. Tobiska, C. J. T. Peixoto, B. Tomé, Z. Torrès, A. Travaini, P. Travnicek, C. Trimarelli, M. Tueros, R. Ulrich, M. Unger, L. Vaclavek, M. Vacula, J. F. V. Galicia, L. Valore, E. Varela, A. Vásquez-Ramírez, D. Veberič, C. Ventura, I. D. V. Quispe, V. Verzi, J. Vicha, J. Vink, S. Vorobiov, H. Wahlberg, C. Watanabe, A. A. Watson, A. Weindl, L. Wiencke, H. Wilczyński, D.

- Wittkowski, B. Wundheiler, A. Yushkov, O. Zapparrata, E. Zas, D. Zavrtanik, M. Zavrtanik, L. Zehrer, Pierre Auger Collaboration, A Search for Photons with Energies Above 2×10^{17} eV Using Hybrid Data from the Low-Energy Extensions of the Pierre Auger Observatory. *Astrophys. J.* **933**, 125 (2022). [doi:10.3847/1538-4357/ac7393](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7393)
7. J. Linsley, Evidence for a Primary Cosmic-Ray Particle with Energy 10^{20} eV. *Phys. Rev. Lett.* **10**, 146–148 (1963). [doi:10.1103/PhysRevLett.10.146](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.146)
 8. A. A. Penzias, R. W. Wilson, A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *Astrophys. J.* **142**, 419–421 (1965). [doi:10.1086/148307](https://doi.org/10.1086/148307)
 9. K. Greisen, End to the Cosmic-Ray Spectrum? *Phys. Rev. Lett.* **16**, 748–750 (1966). [doi:10.1103/PhysRevLett.16.748](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.748)
 10. G. T. Zatsepin, V. A. Kuzmin, Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. *JETP Lett.* **4**, 78 (1966).
 11. R. U. Abbasi, T. Abu-Zayyad, M. Allen, J. F. Amman, G. Archbold, K. Belov, J. W. Belz, S. Y. Ben Zvi, D. R. Bergman, S. A. Blake, O. A. Brusova, G. W. Burt, C. Cannon, Z. Cao, B. C. Connolly, W. Deng, Y. Fedorova, C. B. Finley, R. C. Gray, W. F. Hanlon, C. M. Hoffman, M. H. Holzscheiter, G. Hughes, P. Hüntemeyer, B. F. Jones, C. C. H. Jui, K. Kim, M. A. Kirn, E. C. Loh, M. M. Maestas, N. Manago, L. J. Marek, K. Martens, J. A. J. Matthews, J. N. Matthews, S. A. Moore, A. O'Neill, C. A. Painter, L. Perera, K. Reil, R. Riehle, M. Roberts, D. Rodriguez, N. Sasaki, S. R. Schnetzer, L. M. Scott, G. Sinnis, J. D. Smith, P. Sokolsky, C. Song, R. W. Springer, B. T. Stokes, S. B. Thomas, J. R. Thomas, G. B. Thomson, D. Tupa, S. Westerhoff, L. R. Wiencke, X. Zhang, A. Zech; High Resolution Fly's Eye Collaboration, First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin suppression. *Phys. Rev. Lett.* **100**, 101101 (2008). [doi:10.1103/PhysRevLett.100.101101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.101101) [Medline](#)
 12. T. Abu-Zayyad, R. Aida, M. Allen, R. Anderson, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, E. J. Cho, W. R. Cho, H. Fujii, T. Fujii, T. Fukuda, M. Fukushima, W. Hanlon, K. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Hiyama, K. Honda, T. Iguchi, D. Ikeda, K. Ikuta, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, D. Ivanov, S. Iwamoto, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, T. Kanbe, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, E. Kido, H. B. Kim, H. K. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, K. Kitamoto, S. Kitamura, Y. Kitamura, K. Kobayashi, Y. Kobayashi, Y. Kondo, K. Kuramoto, V. Kuzmin, Y. J. Kwon, J. Lan, S. I. Lim, S. Machida, K. Martens, T. Matsuda, T. Matsuura, T. Matsuyama, J. N. Matthews, M. Minamino, K. Miyata, Y. Murano, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, T. Nakamura, S. W. Nam, T. Nonaka, S. Ogio, M. Ohnishi, H. Ohoka, K. Oki, D. Oku, T. Okuda, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Pshirkov, D. C. Rodriguez, S. Y. Roh, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, N. Sakurai, A. L. Sampson, L. M. Scott, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, J. I. Shin, T. Shirahama, J. D. Smith, P. Sokolsky, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. Stroman, S. Suzuki, Y. Takahashi, M. Takeda, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Tsuyuguchi, Y. Uchihori, S. Udo, H. Ukai, G. Vasiloff, Y. Wada, T. Wong, M. Wood, Y. Yamakawa, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, X. Zhou, R. Zollinger, Z. Zundel, The cosmic-ray energy spectrum observed with

the surface detector of the Telescope Array experiment. *Astrophys. J. Lett.* **768**, L1 (2013). [doi:10.1088/2041-8205/768/1/L1](https://doi.org/10.1088/2041-8205/768/1/L1)

13. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, J. M. Albury, I. Allekotte, A. Almela, J. Alvarez Castillo, J. Alvarez-Muñiz, R. Alves Batista, G. A. Anastasi, L. Anchordoqui, B. Andrada, S. Andringa, C. Aramo, P. R. Araújo Ferreira, H. Asorey, P. Assis, G. Avila, A. M. Badescu, A. Bakalova, A. Balaceanu, F. Barbato, R. J. Barreira Luz, K. H. Becker, J. A. Bellido, C. Berat, M. E. Bertaina, X. Bertou, P. L. Biermann, T. Bister, J. Biteau, A. Blanco, J. Blazek, C. Bleve, M. Boháčová, D. Boncioli, C. Bonifazi, L. Bonneau Arbeletche, N. Borodai, A. M. Botti, J. Brack, T. Bretz, F. L. Briechele, P. Buchholz, A. Bueno, S. Buitink, M. Buscemi, K. S. Caballero-Mora, L. Caccianiga, L. Calcagni, A. Cancio, F. Canfora, I. Caracas, J. M. Carceller, R. Caruso, A. Castellina, F. Catalani, G. Cataldi, L. Cazon, M. Cerda, J. A. Chinellato, K. Choi, J. Chudoba, L. Chytka, R. W. Clay, A. C. Cobos Cerutti, R. Colalillo, A. Coleman, M. R. Coluccia, R. Conceição, A. Condorelli, G. Consolati, F. Contreras, F. Convenga, C. E. Covault, S. Dasso, K. Daumiller, B. R. Dawson, J. A. Day, R. M. de Almeida, J. de Jesús, S. J. de Jong, G. De Mauro, J. R. T. de Mello Neto, I. De Mitri, J. de Oliveira, D. de Oliveira Franco, V. de Souza, E. De Vito, J. Debatin, M. Del Río, O. Deligny, H. Dembinski, N. Dhital, C. Di Giulio, A. Di Matteo, M. L. Díaz Castro, C. Dobrigkeit, J. C. D'Olivo, Q. Dorosti, R. C. Dos Anjos, M. T. Dova, J. Ebr, R. Engel, I. Epicoco, M. Erdmann, C. O. Escobar, A. Etchegoyen, H. Falcke, J. Farmer, G. Farrar, A. C. Fauth, N. Fazzini, F. Feldbusch, F. Fenu, B. Fick, J. M. Figueira, A. Filipčič, T. Fodran, M. M. Freire, T. Fujii, A. Fuster, C. Galea, C. Galelli, B. García, A. L. Garcia Vegas, H. Gemmeke, F. Gesualdi, A. Gherghel-Lascu, P. L. Ghia, U. Giaccari, M. Giammarchi, M. Giller, J. Glombitza, F. Gobbi, F. Gollan, G. Golup, M. Gómez Berisso, P. F. Gómez Vitale, J. P. Gongora, N. González, I. Goos, D. Góra, A. Gorgi, M. Gottowik, T. D. Grubb, F. Guarino, G. P. Guedes, E. Guido, S. Hahn, R. Halliday, M. R. Hampel, P. Hansen, D. Harari, V. M. Harvey, A. Haungs, T. Hebbeker, D. Heck, G. C. Hill, C. Hojvat, J. R. Hörandel, P. Horvath, M. Hrabovský, T. Huege, J. Hulsman, A. Insolia, P. G. Isar, J. A. Johnsen, J. Jurysek, A. Kääpä, K. H. Kampert, B. Keilhauer, J. Kemp, H. O. Klages, M. Kleifges, J. Kleinfeller, M. Köpke, G. Kukec Mezek, B. L. Lago, D. LaHurd, R. G. Lang, M. A. Leigui de Oliveira, V. Lenok, A. Letessier-Selvon, I. Lhenry-Yvon, D. Lo Presti, L. Lopes, R. López, R. Lorek, Q. Luce, A. Lucero, A. Machado Payeras, M. Malacari, G. Mancarella, D. Mandat, B. C. Manning, J. Manshanden, P. Mantsch, S. Marafico, A. G. Mariazzi, I. C. Mariş, G. Marsella, D. Martello, H. Martinez, O. Martínez Bravo, M. Mastrodicasa, H. J. Mathes, J. Matthews, G. Matthiae, E. Mayotte, P. O. Mazur, G. Medina-Tanco, D. Melo, A. Menshikov, K.-D. Merenda, S. Michal, M. I. Micheletti, L. Miramonti, D. Mockler, S. Mollerach, F. Montanet, C. Morello, M. Mostafá, A. L. Müller, M. A. Muller, K. Mulrey, R. Mussa, M. Muzio, W. M. Namasaka, L. Nellen, P. H. Nguyen, M. Niculescu-Oglinzanu, M. Niechciol, D. Nitz, D. Nosek, V. Novotny, L. Nožka, A. Nucita, L. A. Núñez, M. Palatka, J. Pallotta, M. P. Panetta, P. Papenbreer, G. Parente, A. Parra, M. Pech, F. Pedreira, J. Pękala, R. Pelayo, J. Peña-Rodriguez, J. Perez Armand, M. Perlin, L. Perrone, C. Peters, S. Petrera, T. Pierog, M. Pimenta, V. Pirronello, M. Platino, B. Pont, M. Pothast, P. Privitera, M. Prouza, A. Puyleart, S. Querchfeld, J. Rautenberg, D. Ravignani, M. Reininghaus, J. Ridky, F. Riehn, M. Risse, P. Ristori, V. Rizi, W. Rodrigues de Carvalho, G. Rodriguez Fernandez, J. Rodriguez Rojo, M. J. Roncoroni, M. Roth, E. Roulet, A. C. Rovero, P. Ruehl, S. J. Saffi, A.

- Saftoiu, F. Salamida, H. Salazar, G. Salina, J. D. Sanabria Gomez, F. Sánchez, E. M. Santos, E. Santos, F. Sarazin, R. Sarmento, C. Sarmiento-Cano, R. Sato, P. Savina, C. Schäfer, V. Scherini, H. Schieler, M. Schimassek, M. Schimp, F. Schlüter, D. Schmidt, O. Scholten, P. Schovánek, F. G. Schröder, S. Schröder, A. Schulz, S. J. Sciutto, M. Scornavacche, R. C. Shellard, G. Sigl, G. Silli, O. Sima, R. Šmída, P. Sommers, J. F. Soriano, J. Souchard, R. Squartini, M. Stadelmaier, D. Stanca, S. Stanič, J. Stasielak, P. Stassi, A. Streich, M. Suárez-Durán, T. Sudholz, T. Suomijärvi, A. D. Supanitsky, J. Šupík, Z. Szadkowski, A. Taboada, A. Tapia, C. Timmermans, O. Tkachenko, P. Tobiska, C. J. Todero Peixoto, B. Tomé, G. Torralba Elipe, A. Travaini, P. Travnicek, C. Trimarelli, M. Trini, M. Tueros, R. Ulrich, M. Unger, M. Urban, L. Vaclavek, M. Vacula, J. F. Valdés Galicia, I. Valiño, L. Valore, A. van Vliet, E. Varela, B. Vargas Cárdenas, A. Vásquez-Ramírez, D. Veberič, C. Ventura, I. D. Vergara Quispe, V. Verzi, J. Vicha, L. Villaseñor, J. Vink, S. Vorobiov, H. Wahlberg, A. A. Watson, M. Weber, A. Weindl, L. Wiencke, H. Wilczyński, T. Winchen, M. Wirtz, D. Wittkowski, B. Wundheiler, A. Yushkov, O. Zapparrata, E. Zas, D. Zavrtanik, M. Zavrtanik, L. Zehrer, A. Zepeda, M. Ziolkowski, F. Zuccarello; Pierre Auger Collaboration, Features of the Energy Spectrum of Cosmic Rays above 2.5×10^{18} eV Using the Pierre Auger Observatory. *Phys. Rev. Lett.* **125**, 121106 (2020). [doi:10.1103/PhysRevLett.125.121106](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.121106) [Medline](#)
14. T. Abu-Zayyad, R. Aida, M. Allen, R. Anderson, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, E. J. Cho, W. R. Cho, H. Fujii, T. Fujii, T. Fukuda, M. Fukushima, D. Gorbunov, W. Hanlon, K. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Hiyama, K. Honda, T. Iguchi, D. Ikeda, K. Ikuta, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, D. Ivanov, S. Iwamoto, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, T. Kanbe, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, E. Kido, H. B. Kim, H. K. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, K. Kitamoto, K. Kobayashi, Y. Kobayashi, Y. Kondo, K. Kuramoto, V. Kuzmin, Y. J. Kwon, S. I. Lim, S. Machida, K. Martens, J. Martineau, T. Matsuda, T. Matsuura, T. Matsuyama, J. N. Matthews, I. Myers, M. Minamino, K. Miyata, H. Miyauchi, Y. Murano, T. Nakamura, S. W. Nam, T. Nonaka, S. Ogio, M. Ohnishi, H. Ohoka, K. Oki, D. Oku, T. Okuda, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Pshirkov, D. Rodriguez, S. Y. Roh, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, N. Sakurai, A. L. Sampson, L. M. Scott, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, J. I. Shin, T. Shirahama, J. D. Smith, P. Sokolsky, T. J. Sonley, R. W. Springer, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, S. Suzuki, Y. Takahashi, M. Takeda, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Tsuyuguchi, Y. Uchihori, S. Udo, H. Ukai, G. Vasiloff, Y. Wada, T. Wong, M. Wood, Y. Yamakawa, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, S. Yoshida, H. Yoshii, R. Zollinger, Z. Zundel, The surface detector array of the Telescope Array experiment. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **689**, 87–97 (2013). [doi:10.1016/j.nima.2012.05.079](https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.05.079)
15. H. Tokuno, Y. Tameda, M. Takeda, K. Kadota, D. Ikeda, M. Chikawa, T. Fujii, M. Fukushima, K. Honda, N. Inoue, F. Kakimoto, S. Kawana, E. Kido, J. N. Matthews, T. Nonaka, S. Ogio, S. Okuda, S. Ozawa, H. Sagawa, N. Sakurai, T. Shibata, A. Taketa, S. B. Thomas, T. Tomida, Y. Tsunesada, S. Udo, T. Abu-zayyad, R. Aida, M. Allen, R. Anderson, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, E. J. Cho, W. R. Cho, H. Fujii, T. Fukuda, D. Gorbunov, W.

- Hanlon, K. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Hiyama, T. Iguchi, K. Ikuta, T. Ishii, R. Ishimori, D. Ivanov, S. Iwamoto, C. C. H. Jui, O. Kalashev, T. Kanbe, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, H. B. Kim, H. K. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, K. Kitamoto, K. Kobayashi, Y. Kobayashi, Y. Kondo, K. Kuramoto, V. Kuzmin, Y. J. Kwon, S. I. Lim, S. Machida, K. Martens, J. Martineau, T. Matsuda, T. Matsuura, T. Matsuyama, I. Myers, M. Minamino, K. Miyata, H. Miyauchi, Y. Murano, T. Nakamura, S. W. Nam, M. Ohnishi, H. Ohoka, K. Oki, D. Oku, A. Oshima, I. H. Park, M. S. Pshirkov, D. Rodriguez, S. Y. Roh, G. Rubtsov, D. Ryu, A. L. Sampson, L. M. Scott, P. D. Shah, F. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, J. I. Shin, T. Shirahama, J. D. Smith, P. Sokolsky, T. J. Sonley, R. W. Springer, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. Stroman, S. Suzuki, Y. Takahashi, M. Takita, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, S. Troitsky, K. Tsutsumi, Y. Tsuyuguchi, Y. Uchihori, H. Ukai, G. Vasiloff, Y. Wada, T. Wong, M. Wood, Y. Yamakawa, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, S. Yoshida, H. Yoshii, R. Zollinger, Z. Zundel, New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array experiment. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **676**, 54–65 (2012). [doi:10.1016/j.nima.2012.02.044](https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.02.044)
16. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, A. di Matteo, T. Fujii, K. Fujita, M. Fukushima, G. Furlich, T. Goto, W. Hanlon, M. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D. Ivanov, H. M. Jeong, S. M. Jeong, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, S. Kishigami, S. Kitamura, Y. Kitamura, V. Kuzmin, M. Kuznetsov, Y. J. Kwon, K. H. Lee, B. Lubsandorzhiiev, J. P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuyama, J. N. Matthews, R. Mayta, M. Minamino, K. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, R. Nakamura, T. Nakamura, T. Nonaka, H. Oda, S. Ogio, J. Ogura, M. Ohnishi, H. Ohoka, T. Okuda, Y. Omura, M. Ono, R. Onogi, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Pshirkov, D. C. Rodriguez, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, R. Sahara, K. Saito, Y. Saito, N. Sakaki, N. Sakurai, L. M. Scott, T. Seki, K. Sekino, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, H. S. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, T. Suzawa, Y. Takagi, Y. Takahashi, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, T. Wong, M. Yamamoto, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, Y. Zhezher, Z. Zundel, Telescope Array Collaboration, Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode. *Astrophys. J.* **858**, 76 (2018). [doi:10.3847/1538-4357/aabad7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabad7)
17. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, A. di Matteo, T. Fujii, K. Fujita, M. Fukushima, G. Furlich, T. Goto, W. Hanlon, M. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D. Ivanov, H. M. Jeong, S. Jeong, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, S. Kishigami, S. Kitamura, Y. Kitamura, V. Kuzmin, M. Kuznetsov, Y.

- J. Kwon, K. H. Lee, B. Lubsandorzhiev, J. P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuyama, J. N. Matthews, R. Mayta, M. Minamino, K. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, R. Nakamura, T. Nakamura, T. Nonaka, H. Oda, S. Ogio, J. Ogura, M. Ohnishi, H. Ohoka, T. Okuda, Y. Omura, M. Ono, R. Onogi, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Piskunov, M. S. Pshirkov, J. Remington, D. C. Rodriguez, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, R. Sahara, K. Saito, Y. Saito, N. Sakaki, N. Sakurai, L. M. Scott, T. Seki, K. Sekino, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, H. S. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, T. Suzawa, Y. Takagi, Y. Takahashi, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, T. Wong, K. Yada, M. Yamamoto, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, Y. Zhezher, Z. Zundel, Mass composition of ultrahigh-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector data. *Phys. Rev. D* **99**, 022002 (2019).
[doi:10.1103/PhysRevD.99.022002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.022002)
18. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, T. Thouw, “CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers,” Forschungszentrum Karlsruhe Report, FZKA-6019 (1998).
19. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, W. R. Cho, T. Fujii, M. Fukushima, T. Goto, W. Hanlon, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D. Ivanov, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, S. Kitamura, Y. Kitamura, V. Kuzmin, Y. J. Kwon, J. Lan, J. P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuda, T. Matsuyama, J. N. Matthews, M. Minamino, Y. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, T. Nakamura, T. Nonaka, A. Nozato, S. Ogio, J. Ogura, M. Ohnishi, H. Ohoka, K. Oki, T. Okuda, M. Ono, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Pshirkov, D. C. Rodriguez, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, N. Sakurai, L. M. Scott, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, H. S. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, R. W. Springer, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, T. Suzawa, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, G. Vasiloff, T. Wong, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, R. Zollinger, Z. Zundel, The energy spectrum of cosmic rays above $10^{17.2}$ eV measured by the fluorescence detectors of the Telescope Array experiment in seven years. *Astropart. Phys.* **80**, 131–140 (2016).
[doi:10.1016/j.astropartphys.2016.04.002](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.04.002)
20. Materials and methods are available as supplementary materials.
21. R. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Anderson, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, M. J. Chae, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, W. R. Cho, T. Fujii, M. Fukushima, T. Goto, W. Hanlon, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D.

- Ivanov, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, S. Kitamura, Y. Kitamura, V. Kuzmin, Y. J. Kwon, J. Lan, S. I. Lim, J. P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuda, T. Matsuyama, J. N. Matthews, M. Minamino, K. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, T. Nakamura, T. Nonaka, A. Nozato, S. Ogio, J. Ogura, M. Ohnishi, H. Ohoka, K. Oki, T. Okuda, M. Ono, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Pshirkov, D. C. Rodriguez, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, N. Sakurai, A. L. Sampson, L. M. Scott, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, R. W. Springer, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, T. Suzawa, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, G. Vasiloff, T. Wong, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, R. Zollinger, Z. Zundel, Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 EeV in the northern sky measured with the surface detector of the Telescope Array experiment. *Astrophys. J. Lett.* **790**, L21 (2014). [doi:10.1088/2041-8205/790/2/L21](https://doi.org/10.1088/2041-8205/790/2/L21)
22. L. Evans, P. Bryant, LHC Machine. *J. Instrum.* **3**, S08001 (2008). [doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08001)
 23. O. Kalashev, I. V. Kharuk, M. Y. Kuznetsov, G. I. Rubtsov; Telescope Array Collaboration, “Telescope Array search for EeV photons,” in *Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference—PoS(ICRC2021)* (2021), p. 864.
 24. I. Kharuk, O. Kalashev; Telescope Array Collaboration, “Mass composition of Telescope Array’s surface detectors events using deep learning,” in *Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference—PoS(ICRC2021)* (2021), p. 384.
 25. Lightning Exporter (Vaisala, 2023); <https://lightning-exporter.vaisala.com>.
 26. D. J. Bird, S. C. Corbato, H. Y. Dai, J. W. Elbert, K. D. Green, M. A. Huang, D. B. Kieda, S. Ko, C. G. Larsen, E. C. Loh, M. Z. Luo, M. H. Salamon, J. D. Smith, P. Sokolsky, P. Sommers, J. K. K. Tang, S. B. Thomas, Detection of a cosmic ray with measured energy well beyond the expected spectral cutoff due to cosmic microwave radiation. *Astrophys. J.* **441**, 144 (1995). [doi:10.1086/175344](https://doi.org/10.1086/175344)
 27. N. Hayashida, K. Honda, M. Honda, S. Imaizumi, N. Inoue, K. Kadota, F. Kakimoto, K. Kamata, S. Kawaguchi, N. Kawasumi, Y. Matsubara, K. Murakami, M. Nagano, H. Ohoka, M. Takeda, M. Teshima, I. Tsushima, S. Yoshida, H. Yoshii, Observation of a Very Energetic Cosmic Ray Well Beyond the Predicted 2.7 K Cutoff in the Primary Energy Spectrum. *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3491–3494 (1994). [doi:10.1103/PhysRevLett.73.3491](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.3491) [Medline](#)
 28. N. Sakaki, M. Chikawa, M. Fukushima, N. Hayashida, K. Honda, N. Inoue, K. Kadota, F. Kakimoto, S. Kakizawa, K. Kamata, S. Kawaguchi, S. Kawakami, Y. Kawasaki, N. Kawasumi, E. Kusano, A. M. Mahrous, K. Mase, S. Mizobuchi, Y. Morizane, M. Nagano, H. Ohoka, S. Osone, M. Sasaki, M. Sasano, K. Shinozaki, M. Takeda, M. Teshima, R. Torii, I. Tsushima, Y. Uchihori, T. Yamamoto, S. Yoshida, H. Yoshii,

“Cosmic ray energy spectrum above 3×10^{18} -eV observed with AGASA,” in *Proceedings of 27th International Cosmic Ray Conference* (2001), pp. 333–336.

29. P. Abreu, M. Aglietta, J. M. Albury, I. Allekotte, K. Almeida Cheminant, A. Almela, J. Alvarez-Muñiz, R. Alves Batista, J. Ammerman Yebra, G. A. Anastasi, L. Anchordoqui, B. Andrada, S. Andringa, C. Aramo, P. R. Araújo Ferreira, E. Arnone, J. C. Arteaga Velázquez, H. Asorey, P. Assis, G. Avila, E. Avocone, A. M. Badescu, A. Bakalova, A. Balaceanu, F. Barbato, J. A. Bellido, C. Berat, M. E. Bertaina, G. Bhatta, P. L. Biermann, V. Binet, K. Bismark, T. Bister, J. Biteau, J. Blazek, C. Bleve, J. Blümer, M. Boháčová, D. Boncioli, C. Bonifazi, L. Bonneau Arbeletche, N. Borodai, A. M. Botti, J. Brack, T. Bretz, P. G. Brichetto Orcherá, F. L. Briechele, P. Buchholz, A. Bueno, S. Buitink, M. Buscemi, M. Büsken, K. S. Caballero-Mora, L. Caccianiga, F. Canfora, I. Caracas, R. Caruso, A. Castellina, F. Catalani, G. Cataldi, L. Cazon, M. Cerda, J. A. Chinellato, J. Chudoba, L. Chytka, R. W. Clay, A. C. Cobos Cerutti, R. Colalillo, A. Coleman, M. R. Coluccia, R. Conceição, A. Condorelli, G. Consolati, F. Contreras, F. Convenga, D. Correia dos Santos, C. E. Covault, S. Dasso, K. Daumiller, B. R. Dawson, J. A. Day, R. M. de Almeida, J. de Jesús, S. J. de Jong, J. R. T. de Mello Neto, I. De Mitri, J. de Oliveira, D. de Oliveira Franco, F. de Palma, V. de Souza, E. De Vito, A. Del Popolo, M. del Río, O. Deligny, L. Deval, A. di Matteo, M. Dobre, C. Dobrigkeit, J. C. D’Olivo, L. M. Domingues Mendes, R. C. dos Anjos, M. T. Dova, J. Ebr, R. Engel, I. Epicoco, M. Erdmann, C. O. Escobar, A. Etchegoyen, H. Falcke, J. Farmer, G. Farrar, A. C. Fauth, N. Fazzini, F. Feldbusch, F. Fenu, B. Fick, J. M. Figueira, A. Filipčič, T. Fitoussi, T. Fodran, T. Fujii, A. Fuster, C. Galea, C. Galelli, B. García, H. Gemmeke, F. Gesualdi, A. Gherghel-Lascu, P. L. Ghia, U. Giaccari, M. Giammarchi, J. Glombitza, F. Gobbi, F. Gollan, G. Golup, M. Gómez Berisso, P. F. Gómez Vitale, J. P. Gongora, J. M. González, N. González, I. Goos, D. Góra, A. Gorgi, M. Gottowik, T. D. Grubb, F. Guarino, G. P. Guedes, E. Guido, S. Hahn, P. Hamal, M. R. Hampel, P. Hansen, D. Harari, V. M. Harvey, A. Haungs, T. Hebbeker, D. Heck, G. C. Hill, C. Hojvat, J. R. Hörandel, P. Horvath, M. Hrabovský, T. Huege, A. Insolia, P. G. Isar, P. Janecek, J. A. Johnsen, J. Jurysek, A. Kääpä, K. H. Kampert, B. Keilhauer, A. Khakurdikar, V. V. Kizakke Covilakam, H. O. Klages, M. Kleifges, J. Kleinfeller, F. Knapp, N. Kunka, B. L. Lago, N. Langner, M. A. Leigui de Oliveira, V. Lenok, A. Letessier-Selvon, I. Lhenry-Yvon, D. Lo Presti, L. Lopes, R. López, L. Lu, Q. Luce, J. P. Lundquist, A. Machado Payeras, G. Mancarella, D. Mandat, B. C. Manning, J. Manshanden, P. Mantsch, S. Marafico, F. M. Mariani, A. G. Mariazzi, I. C. Mariş, G. Marsella, D. Martello, S. Martinelli, O. Martínez Bravo, M. Mastrodicasa, H. J. Mathes, J. Matthews, G. Matthiae, E. Mayotte, S. Mayotte, P. O. Mazur, G. Medina-Tanco, D. Melo, A. Menshikov, S. Michal, M. I. Micheletti, L. Miramonti, S. Mollerach, F. Montanet, L. Morejon, C. Morello, M. Mostafá, A. L. Müller, M. A. Muller, K. Mulrey, R. Mussa, M. Muzio, W. M. Namasaka, A. Nasr-Esfahani, L. Nellen, G. Nicora, M. Niculescu-Oglinzanu, M. Niechciol, D. Nitz, I. Norwood, D. Nosek, V. Novotny, L. Nožka, A. Nucita, L. A. Núñez, C. Oliveira, M. Palatka, J. Pallotta, P. Papenbreer, G. Parente, A. Parra, J. Pawlowsky, M. Pech, J. Pękala, R. Pelayo, J. Peña-Rodriguez, E. E. Pereira Martins, J. Perez Armand, C. Pérez Bertolli, L. Perrone, S. Petrera, C. Petrucci, T. Pierog, M. Pimenta, V. Pirronello, M. Platino, B. Pont, M. Pothast, P. Privitera, M. Prouza, A. Puyleart, S. Querschfeld, J. Rautenberg, D. Ravignani, M. Reininghaus, J. Ridky, F. Riehn, M. Risse, V. Rizi, W. Rodrigues de Carvalho, J. Rodriguez Rojo, M. J. Roncoroni, S. Rossoni, M. Roth, E.

- Roulet, A. C. Rovero, P. Ruehl, A. Saftoiu, M. Saharan, F. Salamida, H. Salazar, G. Salina, J. D. Sanabria Gomez, F. Sánchez, E. M. Santos, E. Santos, F. Sarazin, R. Sarmiento, R. Sato, P. Savina, C. M. Schäfer, V. Scherini, H. Schieler, M. Schimassek, M. Schimp, F. Schlüter, D. Schmidt, O. Scholten, H. Schoorlemmer, P. Schovánek, F. G. Schröder, J. Schulte, T. Schulz, S. J. Sciutto, M. Scornavacche, A. Segreto, S. Sehgal, R. C. Shellard, G. Sigl, G. Silli, O. Sima, R. Smäu, R. Šmída, P. Sommers, J. F. Soriano, R. Squartini, M. Stadelmaier, D. Stanca, S. Stanič, J. Stasielak, P. Stassi, M. Straub, A. Streich, M. Suárez-Durán, T. Sudholz, T. Suomijärvi, A. D. Supanitsky, Z. Szadkowski, A. Tapia, C. Taricco, C. Timmermans, O. Tkachenko, P. Tobiska, C. J. Todero Peixoto, B. Tomé, Z. Torrès, A. Travaini, P. Travnicek, C. Trimarelli, M. Tüeros, R. Ulrich, M. Unger, L. Vaclavěk, M. Vacula, J. F. Valdés Galicia, L. Valore, E. Varela, A. Vásquez-Ramírez, D. Veberič, C. Ventura, I. D. Vergara Quispe, V. Verzi, J. Vicha, J. Vink, S. Vorobiov, H. Wahlberg, C. Watanabe, A. A. Watson, A. Weindl, L. Wiencke, H. Wilczyński, D. Wittkowski, B. Wundheiler, A. Yushkov, O. Zapparrata, E. Zas, D. Zavrtanik, M. Zavrtanik, L. Zehrer, The Pierre Auger Collaboration, Arrival Directions of Cosmic Rays above 32 EeV from Phase One of the Pierre Auger Observatory. *Astrophys. J.* **935**, 170 (2022). [doi:10.3847/1538-4357/ac7d4e](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac7d4e)
30. V. Verzi, D. Ivanov, Y. Tsunesada, Measurement of energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays. *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2017**, 12A103 (2017). [doi:10.1093/ptep/ptx082](https://doi.org/10.1093/ptep/ptx082)
 31. R. Jansson, G. R. Farrar, A new model of the galactic magnetic field. *Astrophys. J.* **757**, 14 (2012). [doi:10.1088/0004-637X/757/1/14](https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/14)
 32. M. S. Pshirkov, P. G. Tinyakov, P. P. Kronberg, K. J. Newton-McGee, Deriving the global structure of the galactic magnetic field from Faraday rotation measures of extragalactic sources. *Astrophys. J.* **738**, 192 (2011). [doi:10.1088/0004-637X/738/2/192](https://doi.org/10.1088/0004-637X/738/2/192)
 33. R. Alves Batista, A. Dundovic, M. Erdmann, K.-H. Kampert, D. Kuempel, G. Müller, G. Sigl, A. van Vliet, D. Walz, T. Winchen, CRPropa 3—A public astrophysical simulation framework for propagating extraterrestrial ultra-high energy particles. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2016**, 038 (2016). [doi:10.1088/1475-7516/2016/05/038](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/05/038)
 34. S. Abdollahi, F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello, W. B. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, J. Becerra Gonzalez, R. Bellazzini, A. Berretta, E. Bissaldi, R. D. Blandford, E. D. Bloom, R. Bonino, E. Bottacini, T. J. Brandt, J. Bregeon, P. Bruehl, R. Buehler, T. H. Burnett, S. Buson, R. A. Cameron, R. Caputo, P. A. Caraveo, J. M. Casandjian, D. Castro, E. Cavazzuti, E. Charles, S. Chaty, S. Chen, C. C. Cheung, G. Chiaro, S. Ciprini, J. Cohen-Tanugi, L. R. Cominsky, J. Coronado-Blázquez, D. Costantin, A. Cuoco, S. Cutini, F. D’Ammando, M. DeKlotz, P. Torre Luque, F. de Palma, A. Desai, S. W. Digel, N. D. Lalla, M. D. Mauro, L. D. Venere, A. Domínguez, D. Dumora, F. F. Dirrsa, S. J. Fegan, E. C. Ferrara, A. Franckowiak, Y. Fukazawa, S. Funk, P. Fusco, F. Gargano, D. Gasparrini, N. Giglietto, P. Giommi, F. Giordano, M. Giroletti, T. Glanzman, D. Green, I. A. Grenier, S. Griffin, M.-H. Grondin, J. E. Grove, S. Guiriec, A. K. Harding, K. Hayashi, E. Hays, J. W. Hewitt, D. Horan, G. Jóhannesson, T. J. Johnson, T. Kamae, M. Kerr, D. Kocevski, M. Kovac’ević, M. Kuss, D. Landriu, S. Larsson, L. Latronico, M. Lemoine-Goumard, J. Li, I. Liodakis, F. Longo, F. Loparco, B. Lott, M. N. Lovellette, P. Lubrano, G. M. Madejski, S. Maldera, D. Malyshev, A. Manfreda, E. J. Marchesini, L. Marcotulli, G. Martí-Devesa, P. Martin, F. Massaro, M.

- N. Mazziotta, J. E. McEnery, I. Mereu, M. Meyer, P. F. Michelson, N. Mirabal, T. Mizuno, M. E. Monzani, A. Morselli, I. V. Moskalenko, M. Negro, E. Nuss, R. Ojha, N. Omodei, M. Orienti, E. Orlando, J. F. Ormes, M. Palatiello, V. S. Paliya, D. Paneque, Z. Pei, H. Peña-Herazo, J. S. Perkins, M. Persic, M. Pesce-Rollins, V. Petrosian, L. Petrov, F. Piron, H. Poon, T. A. Porter, G. Principe, S. Rainò, R. Rando, M. Razzano, S. Razzaque, A. Reimer, O. Reimer, Q. Remy, T. Reposeur, R. W. Romani, P. M. S. Parkinson, F. K. Schinzel, D. Serini, C. Sgrò, E. J. Siskind, D. A. Smith, G. Spandre, P. Spinelli, A. W. Strong, D. J. Suson, H. Tajima, M. N. Takahashi, D. Tak, J. B. Thayer, D. J. Thompson, L. Tibaldo, D. F. Torres, E. Torresi, J. Valverde, B. V. Klaveren, P. Zyl, K. Wood, M. Yassine, G. Zaharijas, *Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **247**, 33 (2020). [doi:10.3847/1538-4365/ab6bcb](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6bcb)*
35. G. R. Farrar, A. Gruzinov, Giant AGN flares and cosmic ray bursts. *Astrophys. J.* **693**, 329–332 (2009). [doi:10.1088/0004-637X/693/1/329](https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/329)
36. D. Sowards-Emmerd, R. W. Romani, P. F. Michelson, S. E. Healey, P. L. Nolan, A Northern Survey of Gamma-Ray Blazar Candidates. *Astrophys. J.* **626**, 95–103 (2005). [doi:10.1086/429902](https://doi.org/10.1086/429902)
37. M. Y. Kuznetsov, P. G. Tinyakov, UHECR mass composition at highest energies from anisotropy of their arrival directions. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2021**, 065 (2021). [doi:10.1088/1475-7516/2021/04/065](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/04/065)
38. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, I. F. M. Albuquerque, I. Allekotte, A. Almela, J. A. Castillo, J. Alvarez-Muñiz, G. A. Anastasi, L. Anchordoqui, B. Andrada, S. Andringa, C. Aramo, N. Arsene, H. Asorey, P. Assis, G. Avila, A. M. Badescu, A. Balaceanu, F. Barbato, R. J. B. Luz, J. J. Beatty, K. H. Becker, J. A. Bellido, C. Berat, M. E. Bertaina, X. Bertou, P. L. Biermann, J. Biteau, S. G. Blaess, A. Blanco, J. Blazek, C. Bleve, M. Boháčová, C. Bonifazi, N. Borodai, A. M. Botti, J. Brack, I. Brancus, T. Bretz, A. Bridgeman, F. L. Briechle, P. Buchholz, A. Bueno, S. Buitink, M. Buscemi, K. S. Caballero-Mora, L. Caccianiga, A. Cancio, F. Canfora, R. Caruso, A. Castellina, F. Catalani, G. Cataldi, L. Cazon, A. G. Chavez, J. A. Chinellato, J. Chudoba, R. W. Clay, A. C. C. Cerutti, R. Colalillo, A. Coleman, L. Collica, M. R. Coluccia, R. Conceição, G. Consolati, F. Contreras, M. J. Cooper, S. Coutu, C. E. Covault, J. Cronin, S. D’Amico, B. Daniel, S. Dasso, K. Daumiller, B. R. Dawson, R. M. Almeida, S. J. Jong, G. D. Mauro, J. R. T. de Mello Neto, I. D. Mitri, J. Oliveira, V. Souza, J. Debatin, O. Deligny, M. L. D. Castro, F. Diogo, C. Dobrigkeit, J. C. D’Olivo, Q. Dorosti, R. C. Anjos, M. T. Dova, A. Dundovic, J. Ebr, R. Engel, M. Erdmann, M. Erfani, C. O. Escobar, J. Espadanal, A. Etchegoyen, H. Falcke, J. Farmer, G. Farrar, A. C. Fauth, N. Fazzini, F. Fenu, B. Fick, J. M. Figueira, A. Filipčič, M. M. Freire, T. Fujii, A. Fuster, R. Gañor, B. García, F. Gaté, H. Gemmeke, A. Gherghel-Lascu, P. L. Ghia, U. Giaccari, M. Giammarchi, M. Giller, D. Głás, C. Glaser, G. Golup, M. G. Berisso, P. F. G. Vitale, N. González, A. Gorgi, A. F. Grillo, T. D. Grubb, F. Guarino, G. P. Guedes, R. Halliday, M. R. Hampel, P. Hansen, D. Harari, T. A. Harrison, A. Haungs, T. Hebbeker, D. Heck, P. Heimann, A. E. Herve, G. C. Hill, C. Hojvat, E. Holt, P. Homola, J. R. Hörandel, P. Horvath, M. Hrabovský, T. Huege, J. Hulsman, A. Insolia, P. G. Isar, I. Jandt, J. A. Johnsen, M. Josebachuili, J. Jurysek, A. Kääpä, O. Kambeitz, K. H. Kampert, B. Keilhauer, N. Kemmerich, E. Kemp, J. Kemp, R. M. Kieckhafer, H. O. Klages, M. Kleifges, J. Kleinfeller, R. Krause, N. Krohm, D. Kuempel, G. K. Mezek, N. Kunka, A. K. Awad, B. L. Lago, D. LaHurd, R. G. Lang, M.

- Lauscher, R. Legumina, M. A. L. Oliveira, A. Letessier-Selvon, I. Lhenry-Yvon, K. Link, D. L. Presti, L. Lopes, R. López, A. L. Casado, R. Lorek, Q. Luce, A. Lucero, M. Malacari, M. Mallamaci, D. Mandat, P. Mantsch, A. G. Mariazzi, I. C. Mariş, G. Marsella, D. Martello, H. Martinez, O. M. Bravo, J. J. M. Meza, H. J. Mathes, S. Mathys, J. Matthews, G. Matthiae, E. Mayotte, P. O. Mazur, C. Medina, G. Medina-Tanco, D. Melo, A. Menshikov, K.-D. Merenda, S. Michal, M. I. Micheletti, L. Middendorf, L. Miramonti, B. Mitrica, D. Mockler, S. Mollerach, F. Montanet, C. Morello, G. Morlino, M. Mostafá, A. L. Müller, G. Müller, M. A. Muller, S. Müller, R. Mussa, I. Naranjo, L. Nellen, P. H. Nguyen, M. Niculescu-Oglinzanu, M. Niechciol, L. Niemietz, T. Niggemann, D. Nitz, D. Nosek, V. Novotny, L. Nožka, L. A. Núñez, F. Oikonomou, A. Olinto, M. Palatka, J. Pallotta, P. Papenbreer, G. Parente, A. Parra, T. Paul, M. Pech, F. Pedreira, J. Pękala, R. Pelayo, J. Peña-Rodriguez, L. A. S. Pereira, M. Perlin, L. Perrone, C. Peters, S. Petrera, J. Phuntsok, T. Pierog, M. Pimenta, V. Pirronello, M. Platino, M. Plum, J. Poh, C. Porowski, R. R. Prado, P. Privitera, M. Prouza, E. J. Quel, S. Querschfeld, S. Quinn, R. Ramos-Pollan, J. Rautenberg, D. Ravignani, J. Ridky, F. Riehn, M. Risse, P. Ristori, V. Rizi, W. Rodrigues de Carvalho, G. Rodriguez Fernandez, J. Rodriguez Rojo, M. J. Roncoroni, M. Roth, E. Roulet, A. C. Rovero, P. Ruehl, S. J. Saffi, A. Saftoiu, F. Salamida, H. Salazar, A. Saleh, G. Salina, F. Sánchez, P. Sanchez-Lucas, E. M. Santos, E. Santos, F. Sarazin, R. Sarmiento, C. Sarmiento-Cano, R. Sato, M. Schauer, V. Scherini, H. Schieler, M. Schimp, D. Schmidt, O. Scholten, P. Schovánek, F. G. Schröder, S. Schröder, A. Schulz, J. Schumacher, S. J. Sciutto, A. Segreto, A. Shadkam, R. C. Shellard, G. Sigl, G. Silli, R. Šmída, G. R. Snow, P. Sommers, S. Sonntag, J. F. Soriano, R. Squartini, D. Stanca, S. Stanič, J. Stasielak, P. Stassi, M. Stolpovskiy, F. Strafella, A. Streich, F. Suarez, M. S. Durán, T. Sudholz, T. Suomijärvi, A. D. Supanitsky, J. Šupík, J. Swain, Z. Szadkowski, A. Taboada, O. A. Taborda, V. M. Theodoro, C. Timmermans, C. J. T. Peixoto, L. Tomankova, B. Tomé, G. T. Elipe, P. Travnicek, M. Trini, R. Ulrich, M. Unger, M. Urban, J. F. V. Galicia, I. Valiño, L. Valore, G. van Aar, P. van Bodegom, A. M. Berg, A. Vliet, E. Varela, B. V. Cárdenas, R. A. Vázquez, D. Veberič, C. Ventura, I. D. V. Quispe, V. Verzi, J. Vicha, L. Villaseñor, S. Vorobiov, H. Wahlberg, O. Wainberg, D. Walz, A. A. Watson, M. Weber, A. Weindl, M. Wiedeński, L. Wiencke, H. Wilczyński, M. Wirtz, D. Wittkowski, B. Wundheiler, L. Yang, A. Yushkov, E. Zas, D. Zavrtanik, M. Zavrtanik, A. Zepeda, B. Zimmermann, M. Ziolkowski, Z. Zong, F. Zuccarello, The Pierre Auger Collaboration, An Indication of Anisotropy in Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays through Comparison to the Flux Pattern of Extragalactic Gamma-Ray Sources. *Astrophys. J. Lett.* **853**, L29 (2018). [doi:10.3847/2041-8213/aaa66d](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa66d)
39. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, S. A. Blake, R. Cady, B. G. Cheon, J. Chiba, M. Chikawa, A. Matteo, T. Fujii, K. Fujita, M. Fukushima, G. Furlich, T. Goto, W. Hanlon, M. Hayashi, Y. Hayashi, N. Hayashida, K. Hibino, K. Honda, D. Ikeda, N. Inoue, T. Ishii, R. Ishimori, H. Ito, D. Ivanov, H. M. Jeong, S. Jeong, C. C. H. Jui, K. Kadota, F. Kakimoto, O. Kalashev, K. Kasahara, H. Kawai, S. Kawakami, S. Kawana, K. Kawata, E. Kido, H. B. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, S. Kishigami, S. Kitamura, Y. Kitamura, V. Kuzmin, M. Kuznetsov, Y. J. Kwon, K. H. Lee, B. Lubsandorzhiev, J. P. Lundquist, K. Machida, K. Martens, T. Matsuyama, J. N. Matthews, R. Mayta, M. Minamino, K. Mukai, I. Myers, K. Nagasawa, S. Nagataki, R. Nakamura, T. Nakamura, T. Nonaka, H. Oda, S. Ogio, J. Ogura, M.

- Ohnishi, H. Ohoka, T. Okuda, Y. Omura, M. Ono, R. Onogi, A. Oshima, S. Ozawa, I. H. Park, M. S. Pshirkov, J. Remington, D. C. Rodriguez, G. Rubtsov, D. Ryu, H. Sagawa, R. Sahara, K. Saito, Y. Saito, N. Sakaki, N. Sakurai, L. M. Scott, T. Seki, K. Sekino, P. D. Shah, F. Shibata, T. Shibata, H. Shimodaira, B. K. Shin, H. S. Shin, J. D. Smith, P. Sokolsky, B. T. Stokes, S. R. Stratton, T. A. Stroman, T. Suzawa, Y. Takagi, Y. Takahashi, M. Takamura, M. Takeda, R. Takeishi, A. Taketa, M. Takita, Y. Tameda, H. Tanaka, K. Tanaka, M. Tanaka, S. B. Thomas, G. B. Thomson, P. Tinyakov, I. Tkachev, H. Tokuno, T. Tomida, S. Troitsky, Y. Tsunesada, K. Tsutsumi, Y. Uchihori, S. Udo, F. Urban, T. Wong, M. Yamamoto, R. Yamane, H. Yamaoka, K. Yamazaki, J. Yang, K. Yashiro, Y. Yoneda, S. Yoshida, H. Yoshii, Y. Zhezher, Z. Zundel, Testing a Reported Correlation between Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays and a Flux Pattern from nearby Starburst Galaxies using Telescope Array Data. *Astrophys. J. Lett.* **867**, L27 (2018). [doi:10.3847/2041-8213/aabcf9](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aabcf9)
40. R. B. Tully, E. J. Shaya, I. D. Karachentsev, H. M. Courtois, D. D. Kocevski, L. Rizzi, A. Peel, Our Peculiar Motion Away from the Local Void. *Astrophys. J.* **676**, 184–205 (2008). [doi:10.1086/527428](https://doi.org/10.1086/527428)
 41. J. J. Eldridge, L. Xiao, The distance, supernova rate, and supernova progenitors of NGC 6946. *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **485**, L58–L61 (2019). [doi:10.1093/mnrasl/slz030](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slz030)
 42. O. E. Kalashev, E. Kido, Simulations of ultra-high-energy cosmic rays propagation. *J. Exp. Theor. Phys.* **120**, 790–797 (2015). [doi:10.1134/S1063776115040056](https://doi.org/10.1134/S1063776115040056)
 43. T. Fujii, Data of an extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array of Telescope Array experiment, Zenodo (2023); <https://doi.org/10.5281/zenodo.8427755>.
 44. M. Teshima, Y. Matsubara, T. Hara, N. Hayashida, M. Honda, F. Ishikawa, T. Kifune, M. Mori, M. Nagano, K. Nishijima, H. Ohoka, Y. Ohno, G. Tanahashi, Properties of 10^9 - 10^{10} GeV extensive air showers at core distances between 100 and 3000 m. *J. Phys. G Nucl. Phys.* **12**, 1097–1113 (1986). [doi:10.1088/0305-4616/12/10/017](https://doi.org/10.1088/0305-4616/12/10/017)
 45. S. Ostapchenko, Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: QGSJET-II model. *Phys. Rev. D* **83**, 014018 (2011). [doi:10.1103/PhysRevD.83.014018](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.014018)
 46. T. Pierog, I. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, K. Werner, EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider. *Phys. Rev. C* **92**, 034906 (2015). [doi:10.1103/PhysRevC.92.034906](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.034906)
 47. D. Ivanov; Telescope Array Collaboration, “Energy Spectrum Measured by the Telescope Array,” in *Proceedings of 36th International Cosmic Ray Conference—PoS(ICRC2019)* (2019), p. 298.
 48. M. Kuznetsov, P. Tinyakov; Telescope Array Collaboration, “UHECR mass composition from anisotropy of their arrival directions with the Telescope Array SD,” in *Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference—PoS(ICRC2021)* (2021), p. 294.
 49. I. Tkachev, T. Fujii, D. Ivanov, C. C. H. Jui, K. Kawata, J. H. Kim, M. Y. Kuznetsov, T. Nonaka, S. Ogio, G. I. Rubtsov, H. Sagawa, G. B. Thomson, P. G. Tinyakov, I. Tkachev, S. Troitsky; Telescope Array Collaboration, “Telescope Array anisotropy summary,” in

Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference—PoS(ICRC2021) (2021), p. 392.

50. R. Aloisio, D. Boncioli, A. di Matteo, A. F. Grillo, S. Petrer, F. Salamida, SimProp v2r4: Monte Carlo simulation code for UHECR propagation. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2017**, 009 (2017). [doi:10.1088/1475-7516/2017/11/009](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/11/009)