

Evidence of Cosmic-Ray Acceleration up to Sub-PeV Energies in the Supernova Remnant IC 443

หลักฐานการเร่งอนุภาครังสีคอสมิกสู่พลังงานระดับต่ำกว่าพีตะอิเล็กตรอนโวลต์ (Sub-PeV) ในซากซูเปอร์โนวา IC 443

Zhen Cao, the LHAASO Collaboration (including W. Mitthumsiri, P. Pattarakijwanich, D. Ruffolo and A. Sáiz),
Physical Review Letters 136, 161002 (2026)

Cosmic rays are extremely energetic particles that constantly travel through space and occasionally reach Earth. Scientists have studied these particles for more than a century, but one important question remains unanswered: where do they gain such enormous amounts of energy? Supernova remnants, which are the expanding clouds of gas left behind after massive stars explode, have long been considered one of the most likely places where cosmic rays are accelerated. However, obtaining direct evidence that these remnants can accelerate particles to very high energies has been challenging.

This study investigates the supernova remnant IC 443 using observations from the Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO), one of the world's most sensitive facilities for detecting very-high-energy gamma rays. Gamma rays are produced when high-energy particles interact with surrounding matter or radiation, allowing astronomers to trace the origin and energy of cosmic rays indirectly.

The observations revealed two distinct gamma-ray sources within the IC 443 region. One source is compact and located where the supernova shock wave collides with dense molecular clouds. The measured gamma-ray spectrum strongly indicates that protons are being accelerated to energies of at least about 300 teraelectronvolts (TeV), approaching the sub-petaelectronvolt (sub-PeV) range. This provides some of the strongest evidence so far that supernova remnants are capable of accelerating cosmic rays to extremely high energies. The second source is more extended and may be produced by particles that have escaped from the supernova remnant and are interacting with nearby molecular clouds, although alternative explanations involving high-energy electrons are also possible.

These findings improve our understanding of how cosmic rays are generated and transported through our Galaxy. They strengthen the long-standing theory that supernova remnants are important accelerators of Galactic cosmic rays and demonstrate the exceptional capability of LHAASO to explore the highest-energy universe. The results also provide valuable information for future studies of particle acceleration, gamma-ray astronomy, and the origin of cosmic rays.

รังสีคอสมิกเป็นอนุภาคพลังงานสูงที่เดินทางอยู่ทั่วเอกภพและบางส่วนสามารถเดินทางมาถึงโลกได้ แม้ว่านักวิทยาศาสตร์จะศึกษา รังสีคอสมิกมาเป็นเวลานานกว่าหนึ่งศตวรรษ แต่คำถามสำคัญที่ยังคงเป็นปริศนาคือ อนุภาคเหล่านี้ได้รับพลังงานมหาศาลมาจากที่ใด หนึ่งในสมมติฐานที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดคือ ซากของดาวฤกษ์ที่ระเบิดเป็นซูเปอร์โนวา (Supernova Remnant) สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงมากได้ อย่างไรก็ตาม การพิสูจน์เรื่องนี้ด้วยหลักฐานเชิงสังเกตยังทำได้ยาก

งานวิจัยนี้ศึกษาซากซูเปอร์โนวา IC 443 โดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อตรวจวัดรังสีแกมมาพลังงานสูงมาก รังสีแกมมาเหล่านี้เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคพลังงานสูงชนกับก๊าซหรือสสารรอบข้าง จึงสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมว่ารังสีคอสมิกถูกเร่งให้มีพลังงานสูงในบริเวณใด

ผลการศึกษาพบแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาสองแห่งในบริเวณ IC 443 แหล่งแรกเป็นแหล่งกำเนิดขนาดเล็กที่อยู่ในตำแหน่งซึ่งคลื่นกระแทกจากซูเปอร์โนวาปะทะกับเมฆโมเลกุล ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโปรตอนในบริเวณดังกล่าวถูกเร่งให้มีพลังงานอย่างน้อยประมาณ 300 เทระอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเข้าใกล้ระดับซับพิตะอิเล็กตรอนโวลต์ (sub-PeV) นับเป็นหลักฐานสำคัญที่สนับสนุนว่าซากซูเปอร์โนวาสามารถเร่งอนุภาครังสีคอสมิกให้มีพลังงานสูงได้จริง ส่วนแหล่งกำเนิดอีกแห่งมีขนาดใหญ่กว่า และอาจเกิดจากอนุภาคที่หลุดออกจากซากซูเปอร์โนวาแล้วเคลื่อนที่ไปชนกับเมฆโมเลกุลบริเวณใกล้เคียง แม้ว่าจะยังมีความเป็นไปได้ที่รังสีแกมมาบางส่วนจะเกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงก็ตาม

ผลการวิจัยนี้ช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการกำเนิดและการแพร่กระจายของรังสีคอสมิกภายในดาราจักรทางช้างเผือก อีกทั้งยังเป็นหลักฐานสำคัญที่สนับสนุนทฤษฎีที่ว่าซากซูเปอร์โนวาเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดรังสีคอสมิกที่สำคัญของกาแล็กซี นอกจากนี้ งานวิจัยยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของอุปกรณ์ LHAASO ในการศึกษาปรากฏการณ์พลังงานสูงของเอกภพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้านฟิสิกส์ดาราศาสตร์และการศึกษาด้านกำเนิดของรังสีคอสมิกในอนาคต

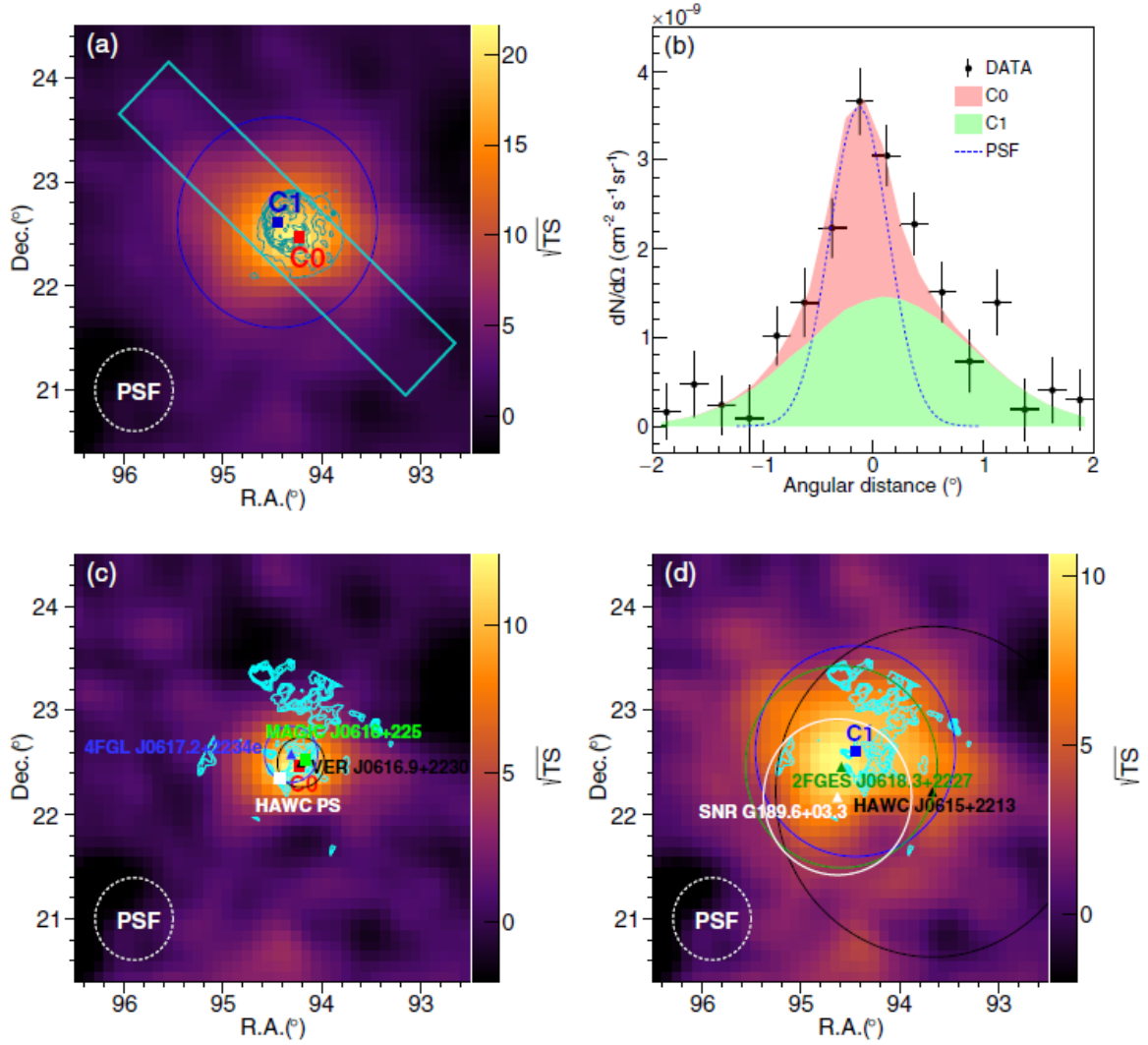


FIG. 1. Panel (a) shows the LHAASO observed significance map of a $3 \times 3 \text{ deg}^2$ region surrounding IC 443 for $E > 0.5 \text{ TeV}$, overlaid with the 1.4-GHz radio continuum contours in dark green [12]. The dashed line in the bottom right corner shows the diameter of the PSF, weighted by the TS value of each energy bin. The red square labels the centroid of C0, and the blue square and circle show the centroid and 68% containment size (intrinsic) of C1. Panel (b) shows the one-dimensional distribution of the integrated γ -ray fluxes from the rectangle box shown in panel (a), together with the PSF convolved profiles of C0 and C1. The zero point is chosen as the midpoint between C0 and C1. The dotted line shows the PSF profile centered at C0. Panels (c) and (d) show the significance maps of C0 and C1 components, respectively. The centroids and 68% extensions (if any) observed by other experiments are also shown for comparison. The cyan contours depict the shocked molecular gas distribution measured by the MWISP project with velocities ranging from -10 km/s to 10 km/s . In panel (d), the centroid and extension of SNR G189.6 + 3.3 are shown in white.