

Los muones nos revelan los secretos de la Gran Pirámide*

Francesco-Luigi Navarra

Mediante el uso de técnicas no invasivas basadas en la absorción de muones procedentes de rayos cósmicos, un equipo internacional de investigadores ha descubierto una gran cavidad oculta en el interior de la pirámide de Keops, la mayor de las pirámides de Guiza

Hoy en día todavía no conocemos la respuesta a la famosa pregunta del físico Isidor Isaac Rabi (1898-1988): “Who ordered that?” (¿Quién pidió eso?) [1]. Desde su descubrimiento en 1936 [2], los muones han aportado muchas contribuciones a la investigación y además en diversos campos. La última de ellas apareció publicada en la revista *Nature* a finales de 2017 [3]. Una colaboración internacional entre Egipto, Francia y Japón (Nagoya-KEK-CEA-Cairo-Dessault-Systemes) ha descubierto la existencia de una “gran cavidad” oculta en el interior de la Gran Pirámide o pirámide de Keops, la mayor de las pirámides de Guiza. Para llevar a cabo este hallazgo los científicos utilizaron varios tipos de detectores de muones procedentes de rayos cósmicos.

Las pirámides de Guiza [4] tienen aproximadamente 4 500 años de antigüedad y aún esconden muchos secretos, empezando por el procedimiento que se utilizó en su construcción. Dado el volumen de la pirámide de Keops, unos 2.5 millones de m³, y el intervalo de tiempo en el que se construyó, que se estima fue de unos 20 años durante el reinado del faraón del mismo nombre, en el siglo xxvi a. C., los obreros tuvieron que colocar una media de 700-800 toneladas de piedra cada día. Además, debió de ser todo un reto para los egipcios elevar los pesados bloques de piedra conforme la pirámide iba ganando altura. Gracias a unos fragmentos de papiro encontrados recientemente hemos podido conocer con más detalle la complejidad logística de la obra —llevada a cabo durante la Edad del Bronce temprana—, pues el material no provenía de ninguna cantera cercana a la zona de construcción. En algunos casos, los bloques procedían de lugares situados a decenas de kilómetros de distancia para el caso de la caliza, que fue el material usado para el exterior de la pirámide, o incluso a cientos de kilómetros, desde donde se trajeron los bloques de granito empleados en las cámaras internas de la pirámide.

Se desconoce el método de construcción de las pirámides, aunque abundan muchas teorías sobre el mismo, la mayoría de ellas basadas en la utilización de distintos tipos de rampas

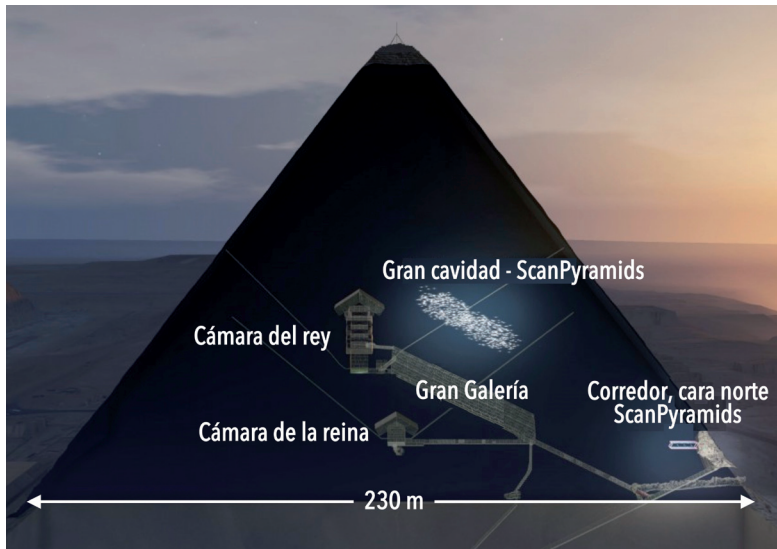


Las tres grandes pirámides de Guiza y, delante de ellas, las pequeñas pirámides de las reinas. De más cerca a más lejos: izquierda (oeste), Menkaura (o Micerino, del griego), la más pequeña de las tres; en el centro, Kefrén, que muestra restos de revestimiento de piedra caliza en su parte superior; derecha (este), Keops, la Gran Pirámide, la más antigua y la más grande. (Fuente: Ricardo Liberato, Wikipedia).

para subir los bloques. Lo que no se sabe con seguridad es si, además de la gran galería y las salas que se conocen hoy en día, existen otros espacios interiores en la pirámide todavía por descubrir, como serían otras galerías utilizadas para deslizar los bloques de piedra hacia su posición final o bien otras cámaras ocultas. Una primera búsqueda de cámaras ocultas en la pirámide de Kefrén empleando detectores de muones fue llevada a cabo por Luis Walter Álvarez (1911-1988) y su equipo a finales de 1960 [5], obteniendo un resultado negativo.

El proyecto ScanPyramids comenzó en el año 2015 [6] como una colaboración entre egipcios e investigadores de un equipo internacional: científicos franceses del Instituto de Conservación e Innovación del Patrimonio (HIP) liderado por Mehdi Tayoubi y un equipo japonés de físicos de partículas elementales de la Universidad de Nagoya, bajo la dirección de Kunihiro Morishima. El proyecto incluye el uso de diferentes técnicas no invasivas (drones, termografía con infrarrojo y absorción de muones) con el fin de estudiar la estructura interna de la Gran Pirámide sin dañarla. A finales de 2015 ya se tuvo constancia de anomalías térmicas, lo que sugirió la existencia de cavidades cercanas a la superficie de la pirámide. Fue en octubre de 2016 cuando, utili-

* Una versión reducida de este artículo, con el título “Muons unveil the secrets of a pyramid”, apareció publicada en el boletín de la Società Italiana di Fisica, *SIF Prima Pagina*, n.º 47, noviembre de 2017.



Sección de la pirámide de Keops que muestra los corredores de acceso, la gran galería, las cámaras del rey y de la reina, cuatro conductos de ventilación, y la ubicación aproximada de la gran cavidad detectada por el equipo ScanPyramids superpuesta sobre la imagen. La anchura de la pirámide es de 230 m y su altura actual es de 139 m (Fuente: ScanPyramids).

zando técnicas de absorción de muones, se tuvo la primera prueba de la existencia de una gran cavidad en el interior de la pirámide. Por último, en 2017 se ratificó la existencia de dicha cavidad utilizando tres tipos distintos de detectores de muones: emulsiones nucleares [7], hodoscopios (detectores que registran las trayectorias de las partículas) fabricados con plástico centelleador [8] y detectores de ionización de gas [9], evolucionados a partir de las cámaras de hilos, inventados originalmente por Georges Charpak (1924-2010) y colaboradores en la década de los noventa del siglo pasado [10], todos ellos con distintas aceptancias, resoluciones e incertidumbres sistemáticas.

El espacio interior encontrado tiene unos 30 m de largo, lo que es comparable a la gran galería, y está localizado a 40 o 50 m de los detectores provistos de emulsión nuclear y de los hodoscopios que se situaron en la cámara de la reina. Las imágenes en estéreo se obtuvieron colocando los detectores en varias posiciones. Así por ejemplo, los detectores de ionización de gas, la mitad de los cuales fueron construidos en el CERN, se ubicaron en el exterior de la pirámide. Esta fue la primera vez que se realizó una ubicación exterior de detectores para el escaneo de una pirámide y sus resultados confirmaron los hallazgos de los situados en el interior de la misma. Desde el punto de vista estadístico, la evidencia de la existencia de esta nueva cavidad es abrumadora, muy superior a 10 sigmas para las cámaras de emulsión, y aproximadamente 10 sigmas para los hodoscopios de centelleo. Las mediciones con detectores de ionización de gas, diferentes de las otras técnicas, no se basan en simulaciones detalladas de la estructura conocida de la pirámide, sino sólo en el ajuste de las distribuciones observadas de muones. Se detectaron, de una manera independiente del modelo, la gran galería, con 8.4 sigmas, y la nueva cavidad, con 5.8 sigmas.

El hallazgo de la nueva cavidad permite darnos cuenta de lo mucho que aún desconocemos sobre la pirámide de Keops, y abre un nuevo abanico de preguntas por responder. Hasta ahora no se puede decir nada con completa seguridad sobre la nueva cavidad. Podría ser una segunda galería o una secuencia de cámaras, pues la resolución actual de los detectores es insuficiente para discernir entre ambas posibilidades. También podría ser simplemente una cavidad situada allí por razones estructurales para evitar ejercer presión sobre la gran galería, similar a las cavidades presentes sobre la cámara del rey. El éxito de este proyecto internacional que ha desvelado nueva información sobre las pirámides de Egipto es el resultado de estudios previos sobre pequeñas y grandes estructuras [11] realizados por distintos grupos de investigación. Algunos de estos estudios los han llevado a cabo equipos italianos del Ministerio de Educación, Universidad e Investigación (MIUR), del Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) y el Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología (INGV). Durante los últimos veinte años se ha utilizado la absorción y difusión de los muones procedentes de los rayos cósmicos en estudios desarrollados en volcanes, como el Monte Asama en Japón [12] o el Vesubio en Italia [13], e incluso en reactores nucleares como el de Fukushima [14].

La tomografía con muones muestra cómo los métodos desarrollados en la física de partículas pueden arrojar luz también en la investigación interdisciplinar. Basta citar dos ejemplos entre los muchos que podríamos mencionar. En primer lugar, las emulsiones nucleares y su rápida lectura automática, que se utilizaron en la imagen de la pirámide de Keops, se desarrollaron para el experimento OPERA buscando la aparición de ν_τ (neutrino tauónico) en el haz de neutrinos del CERN dirigido hacia el laboratorio subterráneo del Gran Sasso en Italia. En segundo lugar, algunas de las cámaras Drift Tubes originalmente construidas para el experimento CMS (Compact Muon Solenoid) del LHC (Large Hadron Collider) del CERN en el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) de Madrid, el INFN de Bolonia, Padua y Torino y en la Universidad RWTH de Aachen, están siendo utilizados en la actualidad por el grupo de Padua para la obtención de imágenes de chatarra y barriles con combustible nuclear gastado [15].

Referencias y notas

- [1] I. I. Rabí exclamó "Who ordered that?" en respuesta a la noticia del descubrimiento de que el muon no era el hadrón que los físicos teóricos habían predicho, sino un nuevo e inesperado tipo de leptón más pesado que el electrón.
- [2] S. H. NEDDERMEYER y C. D. ANDERSON "Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles", *Phys. Rev.* 51, 884-886 (1937).

- [3] K. MORISHIMA *et al.*, "Discovery of a Big Void in Khufu's Pyramid by Observation of Cosmic-Ray Muons", *Nature* 552, 386-390 (2017). <https://www.nature.com/articles/nature24647>
- [4] Hay tres pirámides principales en Guiza: Keops, Ke-fren y Micerino, pero también hay otras pirámides menores.
- [5] L. W. ALVAREZ *et al.*, "Search for Hidden Chambers in the Pyramids", *Science* 167, 832-839 (1970).
- [6] ScanPyramids, <http://www.scanpyramids.org>
- [7] K. MORISHIMA, "Latest Developments in Nuclear Emulsion Technology", *Physics Procedia* 80, 19-24 (2015).
- [8] H. FUJI *et al.*, "Performance of a Remotely Located Muon Radiography System to Identify the Inner Structure of a Nuclear Plant", *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2013, 073C01 (2013).
- [9] S. BOUTEILLE *et al.*, "A Micromegas-Based Telescope for Muon Tomography: The WatTo Experiment", *Nuclear Instruments and Methods A* 834 223-228 (2016).
- [10] Y. GIOTAMARIS, Ph. REBOURGEARD, J. P. ROBERT y G. CHARPAK, "MICROMEGAS: a High-Granularity Position-Sensitive Gaseous Detector for High Particle-Flux Environments", *Nuclear Instruments and Methods A* 376, 29-35 (1996).
- [11] K. NAGAMINE, "Radiography with cosmic-Ray and Compact Accelerator Muons; Exploring Inner-Structure of Large-Scale Objects and Landforms", *Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Physical and Biological Sciences* 92 (8) 265-289 (2016).
- [12] H. K. M. TANAKA *et al.*, "High Resolution Imaging in the Inhomogeneous Crust With Cosmic-Ray Muons Radiography", *Earth and Planetary Science Letters* 263 104-113 (2007).
- [13] F. AMBROSINO *et al.*, "The MU-RAY Project: Detector Technology and First Data From Mt. Vesuvius", *Journal of Instrumentation* 9, C02029 (2014).



Imagen de un detector del CEA compuesto por cuatro placas de detectores de ionización de gas durante su instalación frente a la cara norte de la pirámide de Keops, a 20 m de la base de la pirámide. Un detector se encuentra apuntando a la gran galería, otro en dirección a la nueva cavidad descubierta según los datos obtenidos. De esta forma se pueden obtener evidencias de la nueva cavidad basadas en los datos brutos obtenidos, independientemente del modelado detallado de la estructura interna y externa de la pirámide. (Fuente: ScanPyramids).

- [14] K. BORODZIN *et al.*, "Cosmic Ray Radiography of the Damaged Cores of the Fukushima Reactors", *Physical Review Letters* 109, 152501 (2012).
- [15] E. ÅSTRÖM *et al.*, "Precision Measurements of Linear Scattering Density using Muon Tomography", *Journal of Instrumentation* 11, P07010 (2016).

Francesco-Luigi Navarra
Dipartimento di Fisica e Astronomia,
Università di Bologna, Bologna.
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare,
Sezione di Bologna (Italia)

