

# USO DE RAYOS CÓSMICOS PARA ESTUDIAR LA PIRÁMIDE DEL SOL DE TEOTIHUACAN

*Arnulfo Martínez Dávalos*

*arnulfo@fisica.unam.mx*

*Rubén Alfaro Molina*

*ruben@fisica.unam.mx*

*Ernesto Belmont Moreno*

*belmont@fisica.unam.mx*

*Arturo Menchaca Rocha*

*menchaca@fisica.unam.mx*

*Matías Moreno Yntriago*

*matias@fisica.unam.mx*

*Linda Manzanilla Naim Imanza@servidor.unam.mx*

## USO DE RAYOS CÓSMICOS PARA ESTUDIAR LA PIRÁMIDE DEL SOL DE TEOTIHUACAN

### Resumen

Conjuntando la física y la arqueología se formó un proyecto de investigación de interés para ambas disciplinas que además acrecienta la riqueza cultural de México. Usando muones, que son partículas provenientes de la alta atmósfera, se efectuará una introspección de la Pirámide del Sol de Teotihuacan para conocer su interior sin tocarla.

**Palabras clave:** Teotihuacan, pirámide, sol, muones, detección.

## USING COSMIC RAYS FOR THE STUDY OF THE PYRAMID OF THE SUN AT TEOTIHUACAN

### Abstract

We present a join research project of physics and anthropology of great value for the Mexican heritage. Using muons, cosmic particles from the upper atmosphere, introspection is made of the Sun Pyramid without touching it.

**Keywords:** Teotihuacan, pyramid, sun, muons, detection

## INTRODUCCIÓN

La Pirámide del Sol de Teotihuacan (figura 1) se encuentra localizada en una gran ciudad prehispánica cerca del pueblo de San Juan Teotihuacan, a unos 50 kilómetros al noreste de la actual ciudad de México, en el valle del mismo nombre. De la cultura teotihuacana existen muchas interrogantes. Baste mencionar que el nombre "Teotihuacan" fue puesto por los aztecas cuando llegaron al lugar varios cientos de años después de ser abandonada por sus habitantes originales, quienes la ocuparon a inicios de la Era cristiana hasta 600 d.C. Desde entonces una de las grandes incógnitas de ese sitio maravilloso es ¿Para qué se construyó la Pirámide del Sol, que fue la primera obra monumental de la gran metrópolis? La física se ha unido a la arqueología para buscar respuestas a esta pregunta en un proyecto que involucra investigadores de los Institutos de Física y de Investigaciones Antropológicas, de la UNAM, en el cual se pretende analizar este célebre monumento por una técnica inusual.

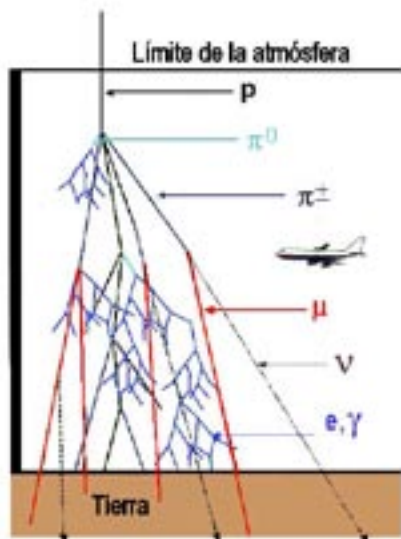


El proyecto de investigación lleva como título "La pirámide del Sol de Teotihuacan, ¿Templo Funerario o Templo Estatal?", y en él se propone usar rayos cósmicos para inspeccionar la estructura interna de este monumento prehispánico en búsqueda de posibles cavidades ocultas que pudiesen haber sido utilizadas con fines funerarios o de ofrenda. Su ausencia fortalecería la idea de que la pirámide es un templo estatal para el culto del Dios de las Tormentas. Cualquiera de las dos opciones nos lleva a interesantes conclusiones acerca de la sociedad teotihuacana.

Fig.1. La Pirámide del Sol de Teotihuacan, vista desde la Pirámide de la Luna, por José Maria Velasco en 1878. Pintura al óleo actualmente en el Museo Nacional de Arte, Ciudad de México.

La idea de usar rayos cósmicos, para estos propósitos, fue utilizada por Luis Álvarez en los años 60's para estudiar la estructura de una de las pirámides de Giza, en Egipto. En aquella ocasión existía la fuerte sospecha de que la pirámide de Kefrén contenía cámaras internas, aún no descubiertas, cuestión que fue desmentida por el experimento de Álvarez. Sin embargo, entre el problema atacado en Egipto y el descrito aquí hay ciertas diferencias que son importantes. Ejemplos relevantes para los físicos son que la pirámide de Kefrén sea dos veces más alta que la del Sol, y que su interior esté hecho de un material aparentemente más homogéneo y denso (bloques de roca caliza) que la de Teotihuacan (tierra orgánica y pequeños fragmentos de toba volcánica).

Para obtener esta especie de radiografía, de una construcción como la Pirámide del Sol, es necesario pensar en algún tipo de radiación lo suficientemente penetrante. Sin embargo, el uso de rayos X queda desechado, por ser rápidamente atenuados en unos cuantos centímetros. Esto resulta insignificante cuando es comparado con las dimensiones de la Pirámide del Sol que tiene una base cuadrada de 200 metros por lado, y más de 60 metros de altura. Una radiación más adecuada para este propósito resulta ser los llamados muones atmosféricos. Los muones son partículas cargadas eléctricamente, cuyas propiedades son similares a las de los electrones, excepto que son inestables (su vida media es de una millonésima de segundo), y 200 veces más masivos. Su símbolo es la letra  $\mu$  del alfabeto griego. Los muones de origen atmosférico son resultado de la interacción entre los denominados rayos cósmicos primarios (principalmente protones) con el gas que rodea nuestro planeta. Los rayos cósmicos primarios, a su vez, son partículas (principalmente protones) de muy alta energía cuyo origen se asocia a objetos astronómicos como son las supernovas. La figura 2 ilustra el proceso que ocurre en la atmósfera, donde se producen primero otras partículas denominadas piones (representadas por la letra griega  $p$ ), cuya vida media es 100 veces más corta que la de los muones, y de cuyo decaimiento resultan (entre otras partículas) los famosos muones. Lo relevante aquí es que estos últimos resultan tener una energía que les da la penetrabilidad adecuada para nuestro estudio y, por ser partículas cargadas, su atenuación está relacionada con la cantidad de materia atravesada.



Los muones que llegan a la superficie terrestre son capaces de penetrarla hasta una profundidad de varios miles de metros. Cabe agregar que la superficie terrestre está bañada constantemente por muones, con un flujo aproximado de un muón por centímetro cuadrado por segundo, que es independiente de la hora y poco dependiente de la dirección a la que miremos. El utilizar muones para estudiar espesores geológicos es una idea originaria de E. P. George, que en 1955 la usó para medir el espesor de la nieve en las montañas de Australia al poner detectores en verano y medir la absorción en invierno. Desde entonces la técnica de atenuación de muones atmosféricos ha encontrado otras aplicaciones prácticas en minería y, más recientemente, en vulcanología.

Cabe agregar que en el presente proyecto se aprovechará la existencia de un túnel prehispánico que yace a 8 metros por debajo la Pirámide del Sol, llegando cerca de su eje de simetría.

Fig. 2. Un posible esquema de un chubasco de rayos cósmicos a partir de un protón p de origen cósmico. Los muones m, (en rojo) llegan a la superficie y la penetran al igual que los neutrinos n (en líneas punteadas), los electrones e y los rayos gamma g (en azul). Sin embargo, estos últimos se quedan en la superficie, mientras que los n son capaces de atravesar todo el planeta sin interactuar, razón por la que no se pueden utilizar para aplicaciones arqueológicas.

Al final de este túnel se colocará un detector que registrará los muones que atraviesen la pirámide indicando al mismo tiempo su dirección. Con esta información, mediante una computadora se reconstruirá lo que sería una "muongrafía" de ese monumento. En ella podremos detectar las heterogeneidades que pudiera haber adentro de la pirámide, correspondiendo a los arqueólogos estudiar su contenido e interpretar su significado.

## EL PROYECTO

A diferencia de la radiografía de una persona, en que se puede asociar las estructuras de la imagen con los diversos órganos, cuya ubicación interna conocemos por experiencia, en nuestro caso esta información no existe. Por lo anterior, el primer paso de este proyecto consiste en simular qué se observaría en una muongrafía si la pirámide fuera de la forma externa ya conocida y su interior fuera homogéneo (sin huecos). En ese caso el perfil esperado sería como se ilustra en la figura 3.

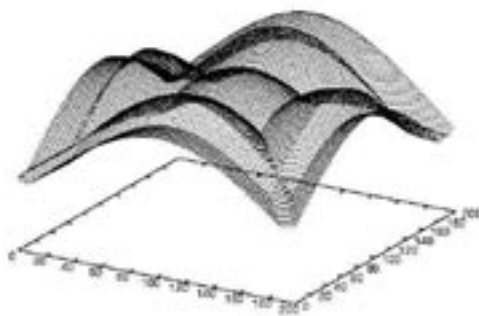


Fig.3 Visión isométrica de la cantidad de material que hay que atravesar desde un punto situado al centro y abajo de la Pirámide del Sol de Teotihuacan hasta la superficie.

Con esta información, comparando la muografía simulada con la experimental podremos indicar dónde hay diferencias que corresponderán a heterogeneidades. Si en alguna dirección existe una menor cantidad de muones, esto nos indicará una zona más densa, tal vez una construcción con piedras; una mayor cantidad de muones nos indicará la existencia de un hueco. La simulación también sirve para estudiar, diseñar y mejorar el propio detector, determinando la resolución espacial esperada, esto es, cuál es el cuerpo o hueco más chico que podremos detectar. También nos indicará por cuánto tiempo habrá que tomar datos para formar una imagen aceptable. Así, utilizando la simulación, podremos construir un mejor detector, capaz de medir los muones e indicar su dirección. Para esto diseñamos y estamos construyendo un sistema de 6 planos detectores con las siguientes funciones (ver figura 4).

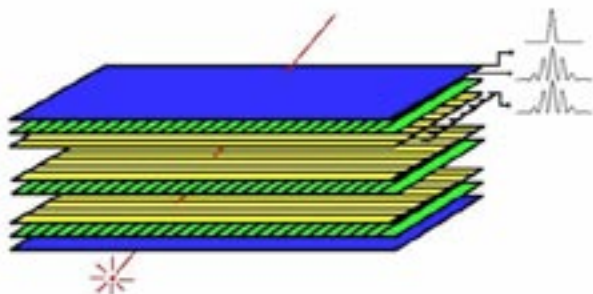


Fig. 4 Esquema simplificado del sistema de detección de muones. En azul las dos placas de detectores de centelleo de coincidencias. En amarillo y verde las cámaras multialámbricas que dependiendo por donde pasada el muón (en rojo) saca unos pulso que nos indicarán la posición X e Y de la trayectoria.

En las capas más externas del detector se encuentran placas de plástico centelleador que son detectores rápidos que sirven para identificar el paso de un muón, eliminando la radiación ambiental que es incapaz de producir señales en ambos centelladores.

Así, un muón es identificado cuando se producen señales simultáneas en los dos detectores. En el volumen que hay en medio de los centelladores se encuentran 6 detectores multialámbricos, que son cámaras gaseosas en el que el plano formado por 200 alambres (separados 5 mm entre si), es utilizado como cátodo, es sometido a un campo eléctrico por dos placas metálicas paralelas que actúan como ánodos, conectados a un alto voltaje. El paso de un muón cerca de uno de los alambres produce en él un pulso eléctrico, que permite saber la posición, es decir, una coordenada. Así, estos detectores se colocan por parejas, uno sobre otro, con sus alambres mutuamente perpendiculares, generando pares de coordenadas x, y. Así se pueden ubicar tres puntos en el espacio por los cuales pasó un muón. La necesidad de 3 pares coordenados, en lugar de 2, para reconstruir la trayectoria de un muón, se debe a que la separación entre alambres introduce una incertidumbre en la determinación de la posición. Analizando la señal garantizamos que se trata de un muón de interés, que está en el cono de visión e informamos al resto del sistema electrónico.

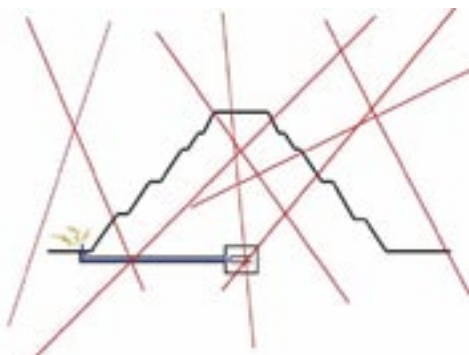


Fig. 5. El proyecto, con los muones en rojo, bañando todo, incluyendo el detector en la cueva debajo de la Pirámide del Sol, y en la puerta un sistema de comunicación por telefonía celular mandando datos hasta Ciudad Universitaria.

Todos estos puntos y trayectorias serán calculados y guardados por una computadora. Las simulaciones nos indican que para obtener una imagen de la pirámide se necesitará una toma de datos de al menos un año. Todos los datos serán almacenados en una computadora y, en algún momento, transmitidos desde Teotihuacan a una computadora semejante en Ciudad Universitaria, al sur de la Ciudad de México. Es decir, tendremos un sistema en el fondo de un túnel debajo de la Pirámide del Sol midiendo rayos cósmicos, por más de un año, y mandando esta información a Ciudad Universitaria (ver figura 5).

El proyecto, actualmente, se encuentra en la etapa de construcción de las cámaras multialámbricas. Ya pasamos las etapas de simulación, diseño de prototipos y construcción de la parte electrónica, así como ya se construyeron los dos detectores de centelleo.

A manera de información adicional, mencionaremos que también hubo que resolver problemas como electrificar el túnel y encapsular todo el sistema de detección de muones, de manera que la humedad, superior al 95% dentro de la oquedad, no afecte los instrumentos electrónicos, ni nuestros aparatos, el entorno original de la cueva prehispánica.

## CONCLUSIÓN

La física de rayos cósmicos resulta ser de gran ayuda para el estudio de la Pirámide del Sol pues, sin tocarla, podremos estudiar su estructura interna, y nos indicará dónde pudiera haber estructuras de interés dentro de su volumen. Los arqueólogos podrán posteriormente decidir, con una muongrafía en mano, en qué dirección iniciar la búsqueda mediante una excavación en caso de que haya algo de interés. Esta técnica no-destructiva de estudio puede aplicarse posteriormente en algunas otras construcciones masivas donde se pueda acceder a alguna parte inferior o lateral donde podamos contrastar los rayos cósmicos provenientes del firmamento.

### Agradecimientos

Para poder llevar a cabo este proyecto se cuenta con el apoyo de la UNAM a través de apoyos directo dado por la Coordinación de la Investigación Científica, la DGAPA (proyecto PAPIIT IN101501) y del CONACYT mediante los proyectos G39091-E y 44380-F.