

## LOS MUONES Y EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

El muón es una de las así llamadas partículas elementales, lo que significa que no está compuesto por otras partículas más fundamentales. Las partículas elementales que componen la materia se dividen en dos grandes grupos, los "quarks" y los "leptones". Hay 6 quarks (llamados "up", "down", "charm", "strange", "top" y "bottom") y 6 leptones (electrón, muón, tau, y sus correspondientes neutrinos). Además, existen partículas elementales que actúan como mediadoras de las interacciones o fuerzas, éstas son el fotón (la "partícula de luz"), los gluones (las partículas mediadoras de la fuerza fuerte), el  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$  (las partículas mediadoras de la fuerza débil). Adicionalmente, el "bosón de Higgs" es la partícula responsable de otorgarle masa a las demás partículas elementales (Figura 1).

El muón recibe su nombre de la letra griega "mu", y se comporta como un electrón, pero tiene una masa 200 veces mayor. Por esta razón, es muy inestable y decae en 2 millonésimas de segundo. En este decaimiento se producen un electrón, un neutrino y un antineutrino. Debido a su corta vida media, a los muones sólo se los observa en los grandes aceleradores de partículas, o como partículas secundarias producidas por los rayos cósmicos.

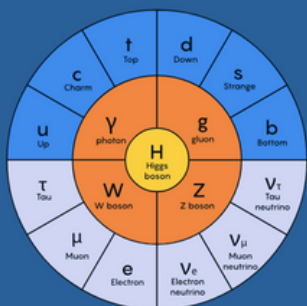


FIGURA 1. MODELO STANDARD DE LA FÍSICA: PARTICULAS Y PARTICULAS PORTADORAS DE LAS FUERZAS

Los muones, tienen la particularidad de ser muy penetrantes, mucho más que electrones o fotones: muones de alta energía son capaces de penetrar cientos de metros de roca antes de detenerse.

Debido a la incidencia de rayos cósmicos sobre nuestro planeta Tierra, se crean muchos muones en las capas altas de la atmósfera, que alcanzan la superficie de la Tierra y penetran en el interior del suelo. Su flujo es considerable: más de 100 muones por metro cuadrado por segundo, a nivel del mar.

Los muones producidos en la atmósfera poseen altas energías y se desplazan a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz. Por ello es posible detectarlas en la superficie de nuestro planeta antes de que decaigan. Como lo describe la teoría de la relatividad, en nuestro marco de referencia el tiempo transcurre lentamente: en el sistema de referencia de un muón con energía de 2 GeV (2 mil millones de electronvolt), un tiempo de vida de 2,2  $\mu$ s (microsegundos) se traduce en nuestro sistema de referencia (el del observador) en una duración de 42  $\mu$ s. Si se trata de distancias, un recorrido de 660 m en el sistema de referencia del muón equivale a 13 km para un observador terrestre.

Los muones son relevantes en el estudio de las cascadas de partículas secundarias, o lluvias atmosféricas extendidas, con las que trabaja el Observatorio Pierre Auger, pues su cantidad en dichas lluvias está relacionado con la naturaleza del rayo cósmico primario: núcleos más pesados producen más muones. Si podemos contar cuántos muones hay en las lluvias atmosféricas (por ejemplo, mediante detectores de centelleo, ver Auger en Foco # 3, julio 2024, y #5, septiembre 2024) podremos responder a la pregunta de "¿qué son los rayos cósmicos, de qué partícula se trata?"

Hasta hace pocos años y siendo una forma natural de radiación a la que estamos expuestos diariamente, el estudio de los muones sólo estaba relacionado con entender sus propiedades y su origen. Sin embargo en la actualidad también son utilizados en singulares estudios que permiten radiografiar pirámides o volcanes y analizar instalaciones geológicas a las que no se tiene acceso. La "tomografía de muones" es un método no invasivo mediante el cual se determina la distribución de densidad interna de objetos masivos (Figura 2).

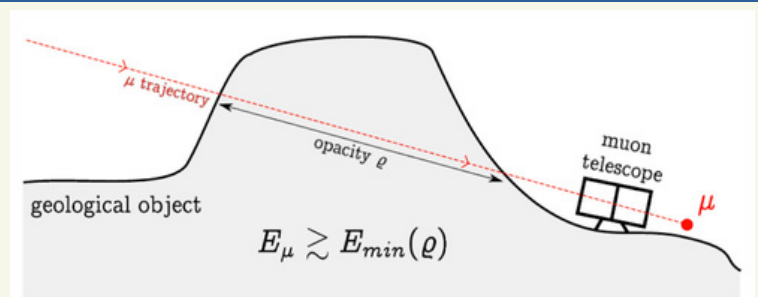


FIGURA 2. ESQUEMA DE UNA CONFIGURACIÓN DE TOMOGRAFÍA DE MUONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD INTERNA DE UNA ESTRUCTURA GEOLÓGICA. LA OPACIDAD ES LA CANTIDAD DE MATERIA A LO LARGO DE LA TRAYECTORIA DEL MUÓN, QUE SE CONSIDERA UNA LÍNEA RECTA.