

# La incomodidad cósmica: LA MATERIA OSCURA COMO LA PIEDRA EN EL ZAPATO DE LA FÍSICA

José David Ruiz Álvarez

Físico, Universidad de Antioquia  
Doctor en Física de Partículas, Université Claude Bernard Lyon I, Francia  
josed.ruiz@udea.edu.co

La física fundamental de nuestros días camina con varias incomodidades en su día a día. La materia oscura es una de las principales porque, aunque compone alrededor de una cuarta parte del universo, desconocemos su naturaleza. La primera cuestión por resolver, antes que la de su composición, será la de cómo buscarla.

En algún momento, todos hemos sentido una incomodidad en los zapatos, sin que logremos entender la causa. Sabemos que podemos quitarnos los zapatos, sacudirlos, hurgar con nuestros dedos en un intento por descubrir el origen del malestar. Por más que busquemos, no logramos encontrarlo. Seguimos caminando, sin saber bien qué nos atormenta como un fantasma podal. No lo vemos, pero nuestro dolor es fiel testigo de que allí está.

Esta comparación sirve para ilustrar cómo la materia oscura puede asemejarse a una gran incomodidad en los zapatos de los físicos, porque, aunque sabemos que está ahí, desconocemos de qué está hecha. Este tipo de extrañeza es tal vez una de las propiedades más importantes de la ciencia, pues hace que un objeto adquiera un carácter de primer interés científico.

Ese es el caso de la materia oscura: le pusimos un nombre a ese objeto incómodo porque debía domesticarse. Aquello que no se podía ver era entonces, en rigor, oscuro. Además, era materia,

porque era *grave*, atraía a otra materia, y entonces así fue como la llamamos *materia oscura*. Su composición hasta ahora es completamente desconocida, aunque algunos de sus comportamientos no lo son tanto: no emite luz, orbita en las galaxias y ayuda a que ellas existan. Sobre las estrellas, al contrario, podemos saber muy bien de qué están hechas al estudiar la luz que emiten.

Según nuestra teoría de cómo se ha formado el universo, sin materia oscura no podríamos ver las galaxias en el telescopio. Pero no solo las galaxias están gobernadas por la interacción gravitacional, hay muchos otros fenómenos que no se pueden explicar sin asumir que hay más materia de la que vemos rondando en el universo.

Si toda la materia que conocemos, la normalita, la de los objetos de nuestro día a día y de la que estamos hechos, está formada por partículas fundamentales, ¿por qué no habría de estar hecha la materia oscura también de alguna partícula fundamental? La incomodidad, así, se instauró en lo más profundo de la física de partículas.

## Modelos simplificados en el estudio de nuevas partículas

La búsqueda de materia oscura ha llevado a los físicos a desarrollar modelos teóricos que expliquen (o intenten hacerlo) su naturaleza y su comportamiento. Los modelos simplificados —herramientas teóricas derivadas del Modelo Estándar, es decir, que experimentan con las partículas y los acoplamientos de este— han sido útiles como referencia en las simulaciones de la manera en que se verían las señales de materia oscura en el Gran Colisionador de Hadrones —LHC, por sus siglas en inglés, *large hadron collider*—. Otros se han descartado por sus limitaciones en relación con el alcance energético en las búsquedas en el LHC, como los modelos de materia oscura inerte y la teoría de campos efectivos.

Entonces, siguiendo con nuestra comparación, ¿cómo diseñar un método que nos llevara efectivamente al encuentro de la incomodidad? ¿Cómo hacer un mapa para circunnavegar el globo cuando aún no se sabe si el mundo puede realmente circunnavegarse? Es decir, ¿cómo debemos planear la búsqueda?

Los modelos simplificados proporcionan un enfoque que se vale de suposiciones teóricas mínimas y un marco de interpretación simple. El reto sería entonces prever todas las posibles señales para la búsqueda de materia oscura con el enfoque del modelo simplificado.

### Usar los datos del LHC para buscar la piedra en el zapato

¿Qué mejor lugar para buscar partículas que un colisionador de partículas? El LHC es una de las herramientas más poderosas en la búsqueda de materia oscura: se trata de hacer chocar protones, analizar las señales de los choques y comparar estas con las señales que tienen los modelos. La ecuación que rige este mecanismo es famosa, ha sido comprobada y vuelta a corroborar: la masa y la energía son equivalentes. La energía la podemos transformar en masa y la masa en energía. Las bombas atómicas hacen lo segundo, y los colisionadores, lo primero.

Si la materia oscura está hecha de una partícula fundamental muy masiva, entonces un colisionador podría acelerar partículas hasta una energía tan alta que produjera dichas partículas de materia oscura. Dado que son partículas con mucha masa, haría falta mucha energía.

### Zapatos nuevos: un enfoque novedoso en el uso de modelos simplificados para la búsqueda de materia oscura

En el Grupo de Investigación Fenomenología de Interacciones Fundamentales de la Universidad de Antioquia —GFIF— diseñamos, entonces, un método para buscar materia oscura en un caso particular de colisiones del LHC. Este colisionador toma protones y los lleva a energías grandísimas antes de colisionarlos. Al acelerar protones a tales energías y hacerlos colisionar, podemos generar partículas de masas muy grandes, miles o millones de veces más grandes que la del mismo protón. Nuestra partícula candidata a materia oscura es, en efecto, tremendamente masiva, y el bosón vectorial que la produce, cien millones de veces más masivo que el protón.

Así pues, examinamos si de las colisiones a grandes energías entre dos protones podemos esperar, una vez cada muchos millones de colisiones, que se produzcan un par de partículas de materia oscura. Esto lo hicimos construyendo un aparataje teórico que nos permitiera predecir la producción de materia oscura sin alterar los demás procesos físicos que ya conocemos en este intrincado mundo de colisiones. Debido a esta simpleza, llamamos este constructo teórico «modelo simplificado».

Ese método se pensó para que fuera independiente del «equipaje» teórico que nos impone la tradición, es decir, el Modelo Estándar de Física de Partículas, para escapar de los sesgos usuales de la teoría y acercarnos a un marco más experimental. En palabras poco usadas, nos pusimos en zapatos nuevos para tratar de andar en un camino extraño y desconocido. Nos cambiamos los zapatos para ver si los nuevos no tenían una piedra adentro.

La topología de fusión de bosones vectoriales —VBF, por sus siglas en inglés, *vector boson fusion*—, proceso en el que dos bosones vectoriales se fusionan para producir nuevas partículas cuya desintegración podría ser materia oscura, es un enfoque novedoso que se ha aplicado recientemente en el contexto de los modelos simplificados. ¡Y encontramos que es importante!

No hemos sido los únicos en estudiarlo así, pues ya otros equipos de científicos han tratado de explorar caminos que indiquen cómo las colisiones del LHC pueden producir materia oscura. Nuestra exploración, por su parte, mostró que hay al menos un camino adicional, inexplorado, para hallar la materia oscura en los millones de colisiones de protones.

Utilizamos diversos métodos computacionales para simular las colisiones del LHC. Con esto pudimos estimar qué tan bien podemos distinguir las colisiones que producen materia oscura de aquellas que solo producen lo que normalmente vemos en el LHC: las partículas de la materia conocida. Requerimos de una alta capacidad computacional y de análisis, lo que nos ha exigido utilizar tecnología de punta tanto en relación con el *hardware* como con el *software*.

Después de un largo trabajo en el cual demostramos que podemos simular muy bien las colisiones del LHC, logramos establecer que con un grado de confianza muy alto hay posibilidades de detectar la materia oscura en caso de que se produzca en el LHC, en los procesos específicos de producción que nosotros decidimos estudiar. No solo encontramos que la topología VBF es un camino nuevo, sino que también nos percatamos de que para algunos tipos de materia oscura puede ser incluso más prometedora que los caminos ya trazados.

Datos del LHC. Imagen: Cortesía del investigador.

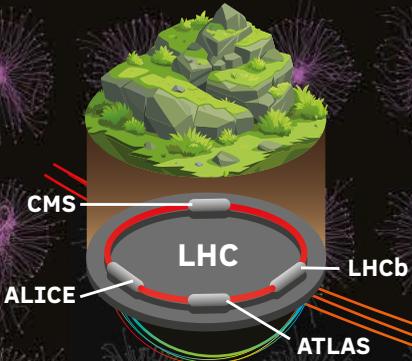
```

root [3] tree->Scan()
*****
*   Row   *   x.x   *   y.y   *   z.z   *
*****
*   0 * -1.102278 * -1.799389 * 4.4528222 *
*   1 * 1.8671779 * -0.596621 * 3.8423130 *
*   2 * -0.524181 * 1.8685209 * 3.7661390 *
*   3 * -0.380611 * 0.9691280 * 1.0840740 *
*   4 * 0.5524539 * -0.212309 * 0.350281 *
*   5 * -0.184954 * 1.1873049 * 1.4439020 *
*   6 * 0.2056429 * -0.770147 * 0.6354169 *
*   7 * 1.0792219 * -0.327389 * 1.2719039 *
*   8 * -0.274919 * -1.721428 * 3.0388989 *
*   9 * 2.0477790 * -0.062677 * 4.1973290 *
*  10 * -0.458676 * -1.443218 * 2.2932660 *
*  11 * 0.3047310 * -0.884635 * 0.8754420 *
*  12 * -0.712336 * -0.222391 * 0.5568810 *
*  13 * -0.271865 * 1.1817669 * 1.4704840 *
*  14 * 0.8862019 * -0.654106 * 1.2132090 *
*  15 * -2.035552 * 0.5276479 * 4.4218831 *
*  16 * -1.459046 * -0.463997 * 2.3441131 *
*  17 * 1.2306610 * -0.005650 * 1.5145590 *
*  18 * 0.0887869 * 1.8853290 * 3.5623469 *
*  19 * -0.314153 * -0.329160 * 0.2070399 *
*  20 * -0.198253 * 0.6460700 * 0.4567120 *
*  21 * -1.636217 * 1.0495510 * 3.7787621 *
*  22 * 1.2211090 * 0.8143829 * 2.1543269 *
*  23 * 1.4131350 * 1.5498369 * 4.3989419 *
*****

root [5] tree->Show(0)
=====> EVENT:0
x           = -1.10228
y           = -1.79939
z           = 4.45282
root [6] tree->Print()
*****
*Tree       :ntuple       : data from ascii file
*Entries   :   1000       : Total =      14008 bytes File Size =      11864 *
*          :              : Tree compression factor =      1.07
*****
*Br        0 :x          : Float_t
*Entries   :   1000       : Total Size=      4541 bytes File Size =      3816 *
*Baskets   :           1 : Basket Size=      32000 bytes Compression=      1.07 *
*.....
*Br        1 :y          : Float_t
*Entries   :   1000       : Total Size=      4541 bytes File Size =      3816 *
*Baskets   :           1 : Basket Size=      32000 bytes Compression=      1.07 *
*.....
*Br        2 :z          : Float_t
*Entries   :   1000       : Total Size=      4541 bytes File Size =      3743 *
*Baskets   :           1 : Basket Size=      32000 bytes Compression=      1.09 *
*.....
root [7]
    
```

# Emular al LHC

La materia oscura constituye aproximadamente una cuarta parte del universo, pero su naturaleza sigue siendo un misterio. Científicos de la Universidad de Antioquia utilizan los datos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en Suiza probando el enfoque de un Modelo Simplificado para detectar esta esquiva entidad.



En las instalaciones del CERN se encuentra el acelerador de partículas más grande del mundo, el LHC (Gran Colisionador de Hadrones).

Tiene una circunferencia de 27 km, está ubicado en la frontera franco-suiza cerca de Ginebra, y está a 100 metros bajo tierra, en él se colisionan protones e iones de plomo.

Para acelerar partículas en el anillo principal, se crean protones y se aumentan su energía para hacerlos colisionar en cuatro puntos donde están los experimentos ALICE, ATLAS, CMS y LHCb.

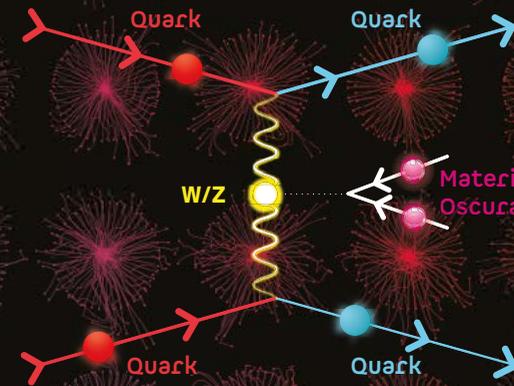
El CMS (Solenoides Compacto de Muones), uno de los detectores más grandes del LHC, busca nueva física. Mide la energía y el momentum de las partículas generadas en las colisiones.

Diversos experimentos han identificado las partículas fundamentales indivisibles:

Quarks	Leptones	Bosones
u Up	e Electrón	$\gamma$ Fotón
d Down	$\nu_e$ Neutrino electrón	W
c Charm	$\mu$ Muon	Z
s Strange	$\nu_\mu$ Neutrino mu	g
t Top	$\tau$ Tau	H
b Bottom	$\nu_\tau$ Neutrino tau	

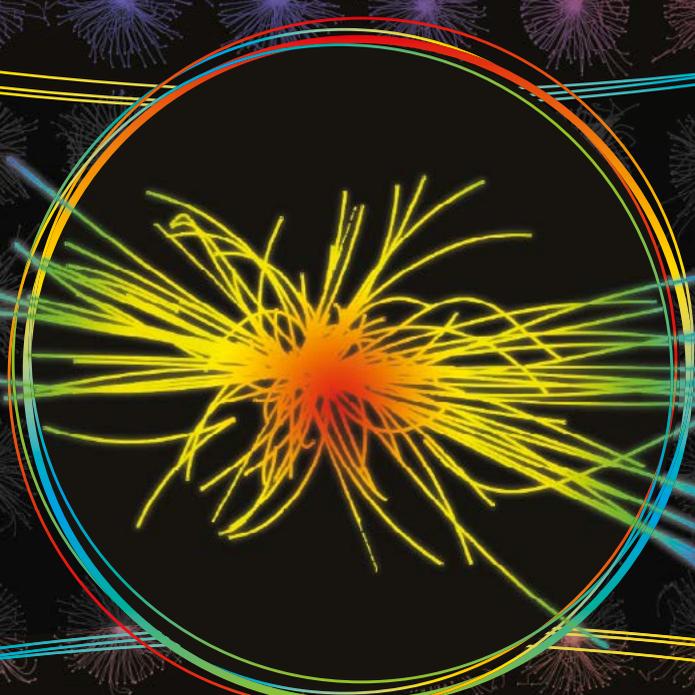
Nuestra partícula candidata a materia oscura es, en efecto, tremendamente masiva, y el bosón vectorial que la produce, cien millones de veces más masivo que el protón.

## Modelo Simplificado



Los modelos simplificados dependen de las masas de las partículas involucradas y del tipo de colisión.

Ayudan a interpretar resultados y diseñar búsquedas en el LHC, y pueden adaptarse a modelos más complejos. Se utilizan para realizar simulaciones computacionales de materia oscura a través de colisiones de partículas. Un mecanismo estudiado es la Fusión de Bosones Vectoriales (VBF), donde quarks colisionan y se fusionan con la ayuda de una partícula mediadora para formar nuevas partículas.



## Análisis de datos

El LHC genera una enorme cantidad de datos en cada colisión. Los modelos simplificados ayudan a filtrar y analizar estos datos, identificando posibles señales de materia oscura entre millones de eventos.



Los datos, en crudo, como meros números que representan las partículas interactuando con el detector

## Cada colisión genera una cantidad colosal de datos:

terabytes por segundo, ¡una verdadera avalancha de información que se acumula rápidamente en petabytes y exabytes! Analizar esta masa de datos es todo un desafío para intentar detectar la débil señal de la materia oscura entre millones de eventos.

Aunque pensemos que con la ciencia hemos logrado entender el universo en su mayoría, se estima que la materia que conocemos conforma solo el 20% de este.



Mientras que la materia oscura conforma cerca del 80% de la materia del universo.

## Seguir caminando con zapatos nuevos

De nuestro hallazgo se sigue la necesidad imperante de caminar experimentalmente el nuevo camino que encontramos. ¿Qué tal que la materia oscura se encuentre justo en ese camino y no en ningún otro de los ya previstos? La materia oscura puede estar allí, esperándonos.

Este método novedoso y exploratorio nos mostró que había oportunidades en el LHC que podríamos seguir explotando. De la mano de la incomodidad, y con la impresión intacta, encontramos, y les contamos a todos a través de un artículo publicado en una revista internacional, que hay formas de hallar la materia oscura en el LHC que nadie antes había realmente sospechado.

La incomodidad continúa y continuará, quién sabe por cuánto tiempo, hasta que probemos la real composición de la materia oscura. Seguiremos buscando, porque en eso consiste la tarea de investigar: en caminar aun con la incomodidad.

El grupo de investigación participa en otros experimentos, como el del solenoide compacto de muones —CMS, por sus siglas en inglés, *compact muon solenoid*—, uno de los ubicados en el LHC para buscar también materia oscura. **X**

## Glosario

**Acoplamiento:** Fortaleza de la interacción entre diversos tipos de partículas.

**Bosón vectorial:** Partícula que media interacciones y que tiene preferencia por ocupar el mismo espacio que otras iguales a ella.

**Modelo Estándar de Física de Partículas:** Modelo que permite explicar la constitución de la materia y sus interacciones con los conocimientos teóricos y experimentales más actuales.

**Modelos simplificados:** Versiones simplificadas de modelos de nuevas partículas que sirven

como hoja de ruta para buscarlas en la naturaleza.

**Topología de Fusión de Bosones Vectoriales:** Proceso de la naturaleza en el cual se fusionan dos bosones vectoriales para producir otras partículas.

Este texto hace parte del proyecto «Búsquedas de materia oscura en el experimento CMS». Los autores que participaron en esta investigación son Santiago Duque Escobar, Daniel Ocampo Henao, José David Ruiz Álvarez y Jessica Velásquez Múnera. Este trabajo fue financiado por el fondo de Primer Proyecto del CODI y el fondo de Democratización del Conocimiento de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia.

# Diagnosticar, empaquetar y reciclar la energía

Ferley Alejandro Vásquez Arroyave

Ph. D. en Ingeniería de Materiales  
ferley.vasquez@udea.edu.co

Jorge Andrés Calderón Gutiérrez

Ph. D. en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales  
andres.calderon@udea.edu.co

Grupo de investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales  
CIDEMAT

En treinta minutos las baterías de ion-litio de un vehículo eléctrico pueden cargarse en un 80 % y darle una autonomía de 500 km. Los desarrollos en electromovilidad dependen de estos sistemas de almacenamiento de energía, que también soportan el funcionamiento de dispositivos de uso común, como los celulares y los computadores.