

El libro que revolucionará la **FÍSICA**

SABINE  
HOSSENFELDER  
**PERDIDOS  
EN LAS  
MATEMÁTICAS**

Cómo la belleza  
confunde a los físicos

*Ariel*

Sabine Hossenfelder

# Perdidos en las matemáticas

Cómo la belleza confunde a los físicos

Traducción de Jorge Paredes

*Ariel*

Título original:  
*Lost in Math*

Primera edición: mayo de 2019

© 2018, Sabine Hossenfelder  
Todos los derechos reservados  
© 2019, Jorge Paredes Soberón, por la traducción

Derechos exclusivos de edición en español  
reservados para todo el mundo  
y propiedad de la traducción:  
© 2019, Editorial Planeta, S. A.  
Avda. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona  
Editorial Ariel es un sello editorial de Planeta, S. A.  
[www.ariel.es](http://www.ariel.es)

ISBN: 978-84-344-3104-1  
Depósito legal: B. 9.044-2019

Impreso en España

El papel utilizado para la impresión de este libro  
es cien por cien libre de cloro y está calificado como papel ecológico.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita  
fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

Puede contactar con CEDRO a través de la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com)  
o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

## Índice

Prólogo .....	11
1. Las reglas ocultas de la física .....	13
2. Qué mundo más maravilloso .....	33
3. El estado de la unión. ....	63
4. Grietas en los cimientos .....	95
5. Teorías ideales .....	121
6. La incomprensible comprensión de la mecánica cuántica .....	159
7. Una regla para todos .....	183
8. El espacio, la última frontera .....	223
9. El universo, todo lo que hay y el resto .....	253
10. El conocimiento es poder .....	287
Agradecimientos .....	307
Apéndice A: Las partículas del modelo estándar ...	309
Apéndice B: El problema de la naturalidad .....	311
Apéndice C: Qué puedes hacer para ayudar .....	315
Notas .....	321
Índice temático .....	347

## Las reglas ocultas de la física

Cuando me doy cuenta de que ya no entiendo la física. Hablo con amigos y colegas, veo que no soy la única que se siente confusa y me dispongo a bajar la razón de las nubes.

### EL ENIGMA DEL BUEN CIENTÍFICO

Invento nuevas leyes de la naturaleza; así es como me gano la vida. Formo parte de los miles de investigadores e investigadoras cuyo cometido es mejorar nuestras teorías de la física de partículas. En el templo del conocimiento, somos los que excavamos en el sótano y examinamos los cimientos. Inspeccionamos las grietas, los defectos sospechosos de las teorías existentes y, cuando topamos con algo, recurrimos a los físicos experimentales para que desentierren las capas que se encuentran a mayor profundidad. Durante el siglo pasado, esta división del trabajo entre físicos teóricos y experimentales funcionó muy bien. Sin embargo, para mi generación ha sido increíblemente infructuosa.

Tras veinte años en el campo de la física teórica, la mayoría de las personas que conozco han dedicado su carrera profesional a estudiar cosas que nadie ha visto. Han elabo-

rado nuevas teorías complicadas, como la idea de que nuestro universo no es más que uno entre infinitos, los cuales forman un «multiverso». Han inventado montones de nuevas partículas, han declarado que somos proyecciones de un espacio de otra dimensión y que el espacio se genera por agujeros de gusano que conectan lugares distantes.

Esas ideas son altamente controvertidas, pero extremadamente populares; especulativas, pero intrigantes; bonitas, pero inútiles. La mayoría de ellas son tan difíciles de probar que resultan prácticamente indemostrables. Otras no pueden probarse ni siquiera desde un punto de vista teórico. Lo que tienen en común es que son defendidas por teóricos convencidos de que sus matemáticas contienen un elemento de verdad sobre la naturaleza. Creen que sus teorías son demasiado buenas para no ser ciertas.

La invención de nuevas leyes naturales —el desarrollo teórico— no se enseña en las clases ni se explica en los libros de texto. En parte, los físicos lo aprenden estudiando la historia de la ciencia, pero la mayoría la recogen de colegas, amigos, mentores, supervisores y críticos anteriores. Se trata, en gran medida, de experiencia, de una intuición fruto del esfuerzo, que pasa de una generación a otra. Cuando se les pide que valoren las expectativas de una teoría recién inventada y no probada, los físicos recurren a los conceptos de naturalidad, sencillez o elegancia y belleza. Esas reglas ocultas están omnipresentes en los fundamentos de la física. Son inestimables y absolutamente contrarias a la exigencia científica de objetividad.

Las normas ocultas nos perjudican. Aunque hayamos planteado gran cantidad de nuevas leyes naturales, ninguna de ellas ha sido confirmada. Y, mientras era testigo de cómo mi profesión se sumía en la crisis, también yo me sumí en una crisis personal. Ya no estoy segura de que lo que hacemos aquí, en los fundamentos de la física, sea ciencia. Y, si no lo es, ¿por qué estoy perdiendo el tiempo?

Me dediqué a la física porque no entiendo el comportamiento humano. Me dediqué a la física porque las matemáticas explican las cosas tal como son. Me gustaba la nitidez, la maquinaria inequívoca, el dominio de las matemáticas sobre la naturaleza. Dos décadas después, lo que me impide entender la física es que sigo sin entender el comportamiento humano.

«No podemos establecer reglas matemáticas exactas que determinen si una teoría es atractiva o no —dice Gian Francesco Giudice—. Sin embargo, es sorprendente cómo la belleza y la elegancia de una teoría son reconocidas universalmente por personas de diferentes culturas. Si te digo: “Mira, tengo un nuevo artículo y mi teoría es muy bonita”, no tengo que explicarte los detalles, sabrás por qué estoy emocionado, ¿verdad?»

Yo no lo entiendo. Por eso hablo con él. ¿Por qué habría de importarles a las leyes de la naturaleza lo que a mí me parezca bonito? Esa conexión entre el universo y yo parece muy mística, muy romántica, muy impropia de mí.

Pero Gian no cree que a la naturaleza le importe lo que a mí me parece bonito, sino lo que a él le parece bonito.

«La mayoría de veces es una sensación visceral —dice—, nada que puedas medir en términos matemáticos: se trata de lo que llamamos intuición física. Hay una importante diferencia en cuanto a la forma de ver la belleza de los físicos y los matemáticos. La adecuada combinación entre la explicación de hechos empíricos y la utilización de principios fundamentales es lo que hace que una teoría física sea exitosa y bella.»

Gian es el responsable del departamento teórico de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire [CERN]). El CERN dispone del que en la actualidad es el mayor acelerador de partículas, el Gran Colisionador de Hadrones (Large Hadron Collider [LHC]), la investigación más mi-

nuciosa de la humanidad acerca de las piezas elementales de la materia: un túnel subterráneo de 6.000 millones de dólares y 26 kilómetros en el que se aceleran los protones y se los hace colisionar casi a la velocidad de la luz.

El LHC es un conjunto de extremos: imanes superenfriados, un vacío extremo, grupos de ordenadores que, durante los experimentos, registran alrededor de tres gigabytes de datos —equivalentes a varios miles de ebooks— por segundo. El LHC aunó miles de científicos, décadas de investigación y miles de millones de componentes de alta tecnología con un único objetivo: descubrir de qué estamos hechos.

«La física es un juego sutil —prosigue Gian—, y descubrir sus reglas requiere no solo racionalidad, sino también un juicio subjetivo. Para mí, este aspecto irracional es lo que hace que la física sea divertida y emocionante.»

Estoy telefoneando desde mi piso, con cajas de cartón apiladas a mi alrededor. Mi cargo en Estocolmo ha concluido; es hora de pasar página y tratar de conseguir otra beca de investigación.

Cuando me licencié, pensaba que esta comunidad sería como un hogar, una familia de investigadores de ideas afines que trataban de entender la naturaleza. Sin embargo, me he ido alejando cada vez más de unos colegas que, por un lado, predicaban la importancia del juicio empírico objetivo y, por otro, utilizan criterios estéticos para defender sus teorías favoritas.

«Cuando encuentras una solución a un problema sobre el que has estado trabajando, sientes una emoción interna —dice Gian—. Es el momento en que, de repente, empiezas a ver que la estructura emerge tras tu razonamiento.»

La investigación de Gian se ha centrado en desarrollar nuevas teorías sobre la física de partículas que plantean la posibilidad de resolver problemas de las teorías existentes.



Ha elaborado un método para cuantificar la naturalidad de una teoría, una medida matemática para valorar hasta qué punto una teoría depende de coincidencias improbables.<sup>1</sup> Cuanto más natural sea una teoría, menos coincidencias necesitará y más atractiva resultará.

«La sensación de belleza de una teoría física tiene que ser algo programado en nuestro cerebro y no una creación social. Es algo que toca una tecla en nuestro interior —dice—. Cuando te topas con una teoría bonita experimentas la misma reacción emocional que sientes ante una obra de arte.»

No es que no sepa de qué está hablando. Lo que no sé es por qué importa. Dudo que mi sentido de la belleza sea una guía fiable para revelar leyes fundamentales de la naturaleza, leyes que determinan el comportamiento de entidades de las que no tengo, nunca he tenido y nunca tendré conciencia sensorial directa. Para que esté instalado en mi cerebro, debió de ser beneficioso durante la selección natural. Sin embargo, ¿qué ventaja evolutiva ha supuesto alguna vez entender la gravedad cuántica?

Y, aunque crear obras bellas es un oficio respetable, la ciencia no es un arte. No buscamos teorías para provocar reacciones emocionales; buscamos explicaciones a lo que observamos. La ciencia es una empresa organizada para superar las limitaciones de la cognición humana y evitar las falacias de la intuición. La ciencia no tiene que ver con la emoción; tiene que ver con números y ecuaciones, datos y gráficas, hechos y lógica.

Creo que yo quería que me demostrara que estaba equivocada.

Cuando le pregunto a Gian qué conclusión saca de los recientes datos del LHC, dice: «Estamos muy confundidos». Y yo, por fin, entiendo algo.

## FRACASO

Durante los primeros años después de su puesta en marcha, el LHC detectó diligentemente una partícula denominada bosón de Higgs, cuya existencia había sido predicha en la década de los sesenta. Mis colegas y yo teníamos muchas esperanzas de que aquel proyecto de miles de millones de dólares hiciera algo más que limitarse a confirmar lo que nadie ponía en duda. Habíamos encontrado algunas grietas prometedoras en los fundamentos que nos convencieron de que el LHC también crearía otras partículas no descubiertas hasta la fecha. Estábamos equivocados. El LHC no ha descubierto nada que pudiera respaldar nuestras recién inventadas leyes de la naturaleza.

A nuestros amigos astrofísicos no les ha ido mucho mejor. En la década de los años treinta, habían descubierto grupos de galaxias con mucha más masa que toda la materia visible combinada. Incluso teniendo en cuenta la gran incertidumbre de los datos, se necesita un nuevo tipo de «materia oscura» para explicar las observaciones. Las pruebas de la fuerza gravitacional de la materia oscura se han ido acumulando, de modo que estamos seguros de que está ahí. Sin embargo, de qué está hecha sigue siendo un misterio. Los astrofísicos creen que se trata de algún tipo de partícula que no está presente aquí en la Tierra, una que no absorbe ni emite luz. Pensaron en nuevas leyes de la naturaleza, en teorías sin confirmar para que rigieran la construcción de detectores destinados a probar sus ideas. Desde la década de los ochenta, gran cantidad de equipos de investigación han ido a la caza de esas hipotéticas partículas de materia oscura. No las han encontrado. Las nuevas teorías no han sido confirmadas.

La situación parece igualmente desalentadora en el campo de la cosmología, en el cual los físicos tratan en vano de entender qué es lo que hace que el universo se expanda

cada vez más rápido, observación atribuida a la «energía oscura». Pueden demostrar desde un punto de vista matemático que ese extraño sustrato no es más que la energía transportada por el espacio vacío y, a pesar de ello, no pueden calcular la cantidad de energía. Se trata de una de las grietas de los fundamentos a través de las cuales los físicos intentan atisbar algo, pero, hasta la fecha, no han conseguido ver nada que respalde las nuevas teorías que han diseñado para explicar la energía oscura.

Por otra parte, en el campo de los fundamentos cuánticos, nuestros colegas quieren elaborar una teoría mejor que no tenga ningún tipo de defecto. Actúan basándose en la convicción de que hay algún fallo en las estructuras matemáticas que no se corresponden con entidades mensurables. Les fastidia que, tal como se quejaban Richard Feynman, Niels Bohr y otros héroes de la física del siglo pasado, «nadie entiende la mecánica cuántica». Los investigadores de los fundamentos cuánticos quieren inventar teorías mejores y creer, como todos los demás, que están en la grieta correcta. Pero, ¡ay!, todos los experimentos han confirmado las predicciones de la teoría incomprensible del siglo pasado. ¿Y las nuevas teorías? Siguen siendo especulaciones no comprobadas.

Se dedicaron enormes esfuerzos a esos intentos fallidos de descubrir nuevas leyes de la naturaleza. Sin embargo, desde hace ya más de treinta años, no hemos sido capaces de mejorar los fundamentos de la física.

¿Así que quieres saber qué sostiene el mundo, cómo se creó el universo y qué normas rigen nuestra existencia? La mejor manera de aproximarte a una respuesta será seguir el rastro de los hechos hasta la base de la ciencia. Síguelo hasta que los hechos escaseen y tu viaje se vea obstaculizado por teóricos que discuten acerca de cuál es la teoría más bonita. Entonces sabrás que has llegado a los cimientos.

Los fundamentos de la física son aquellos ingredientes de nuestras teorías que, por lo que sabemos actualmente, no pueden derivarse de algo más simple. En este nivel inferior se encuentran actualmente el espacio, el tiempo y veinticinco partículas, junto con las ecuaciones que codifican su comportamiento. Las materias de mi área de investigación son, por tanto, partículas que se mueven a través del espacio y del tiempo, y que ocasionalmente colisionan entre sí o forman compuestos. No pienses en ellas como bolitas; no lo son, debido a la mecánica cuántica (volveremos sobre esto más adelante). Mejor piensa en ellas como nubes que pueden adoptar cualquier forma.

En los fundamentos de la física tratamos únicamente con partículas que no pueden descomponerse más; las denominamos «partículas elementales». Por lo que sabemos en la actualidad, no tienen subestructura. Sin embargo, las partículas elementales pueden combinarse para formar átomos, moléculas, proteínas y, de ese modo, crear la enorme variedad de la estructura que vemos a nuestro alrededor. Tú, yo y todo lo que existe en el universo estamos hechos de esas veinticinco partículas.

Pero las partículas, por sí solas, no son tan interesantes. Lo interesante son las relaciones entre ellas, los principios que determinan su interacción, la estructura de las leyes que dieron origen al universo y posibilitaron nuestra existencia. En nuestro juego, lo que nos importa son las reglas, no las piezas. Y la lección más importante que hemos aprendido es que la naturaleza juega según las reglas de las matemáticas.

## HECHAS DE MATEMÁTICAS

En la física, las teorías están hechas de matemáticas. No recurrimos a las matemáticas para asustar a quienes no están

familiarizados con la geometría diferencial y las álgebras de Lie; las utilizamos porque somos tontos. Las matemáticas nos obligan a ser honrados, impiden que nos mintamos a nosotros mismos y a los demás. Con las matemáticas te puedes equivocar, pero no puedes mentir.

Nuestro cometido como físicos teóricos consiste en utilizar las matemáticas para describir observaciones existentes o bien hacer predicciones que orienten las estrategias experimentales. Utilizar las matemáticas en el desarrollo teórico impone rigor lógico y coherencia interna; garantiza que las teorías no sean ambiguas y que las conclusiones sean reproducibles.

El éxito de las matemáticas en la física ha sido tremendo y, por consiguiente, este estándar de calidad se aplica de manera rigurosa. Las teorías que elaboramos actualmente son conjuntos de premisas —relaciones o definiciones matemáticas— e interpretaciones que conectan las matemáticas con los datos observables del mundo real.

Pero no elaboramos teorías escribiendo premisas para, a continuación, extraer las consecuencias observables en una secuencia de teoremas y pruebas. En física, las teorías empiezan casi siempre como un impreciso conjunto de ideas. La tarea de ordenar el caos generado por los físicos a la hora de elaborar una teoría y encontrar un conjunto nítido de premisas a partir de las cuales pueda extraerse una teoría completa, se deja a menudo en manos de nuestros colegas del campo de la física matemática, una rama de las matemáticas, no de la física.

En su mayoría, los físicos y los matemáticos han establecido una división del trabajo muy precisa en la cual los primeros se quejan de la minuciosidad de los segundos y los segundos se quejan de la dejadez de los primeros. No obstante, en ambos casos, somos significativamente conscientes de que los avances en un campo impulsan los avances en el otro. Desde la teoría de la probabilidad y la teoría del caos

hasta las teorías cuánticas que fundamentan la moderna física de partículas, las matemáticas y la física han ido siempre de la mano.

Pero la física no es matemática. Además de ser coherente internamente (no dar pie a conclusiones contradictorias entre sí), una teoría exitosa debe ser también coherente con la observación (no entrar en contradicción con los datos). En mi área de la física, en la cual abordamos las cuestiones más fundamentales, esta es una exigencia muy rigurosa. Existen tantos datos que realizar todos los cálculos necesarios para las nuevas teorías planteadas simplemente no es factible. Es, además, innecesario, ya que existe un atajo: primero demostramos que una nueva teoría coincide con teorías antiguas ya confirmadas para medir su precisión, reproduciendo así los logros de la teoría anterior. De ese modo, solamente tenemos que incorporar cálculos relativos a las novedades que la nueva teoría pueda explicar.

Demstrar que una teoría nueva reproduce todos los logros de teorías antiguas de éxito puede resultar extremadamente difícil. Ello se debe a que una teoría nueva podría utilizar un marco matemático totalmente diferente que no se parezca en absoluto al de la antigua teoría. Descubrir la manera de mostrar que, a pesar de todo, ambas llegan a las mismas predicciones sobre las observaciones realizadas, requiere a menudo encontrar una forma adecuada de reformular la nueva teoría. Esto es sencillo en los casos en que la nueva teoría emplea directamente las matemáticas de la antigua, pero puede ser un gran obstáculo en el caso de marcos totalmente nuevos.

Einstein, por ejemplo, batalló durante años para probar que la relatividad general, su nueva teoría de la gravedad, reproducía los éxitos de su predecesora, la gravedad newtoniana. El problema no era que su teoría estuviera equivocada; el problema era que no sabía cómo encontrar el potencial gravitacional de Newton en su propia teoría. Los cálculos

matemáticos de Einstein eran correctos, pero faltaba la identificación con el mundo real. Únicamente tras varios intentos dio con la manera adecuada de hacerlo. Las matemáticas correctas son solo una parte de la teoría correcta.

Hay otras razones por las que utilizamos las matemáticas en la física. Además de hacer que seamos honrados, las matemáticas son la terminología más económica e inequívoca que conocemos. El lenguaje es maleable, depende del contexto y de la interpretación. Sin embargo, a las matemáticas no les importan la cultura o la historia. Si mil personas leen un libro, leen mil libros diferentes. Sin embargo, si mil personas leen una ecuación, leen la misma ecuación.

No obstante, la principal razón por la que utilizamos las matemáticas en la física es porque podemos.

#### LA CODICIA DE LA FÍSICA

Mientras que la coherencia lógica es siempre un requisito de una teoría científica, no todas las disciplinas se prestan al modelo matemático; utilizar un lenguaje tan riguroso no tiene sentido si los datos no son igualmente rigurosos. De todas las disciplinas científicas, la física se ocupa del sistema más sencillo, haciendo que sea ideal para el modelo matemático.

En la física, los temas de estudio son en gran medida reproducibles. Entendemos claramente cómo controlar entornos experimentales y qué efectos pueden pasarse por alto sin sacrificar la precisión. En psicología, por ejemplo, los resultados son difíciles de reproducir porque no hay dos personas iguales y casi nunca se sabe con exactitud qué peculiaridades podrían tener influencia. Pero se trata de un problema que no tenemos en la física. Los átomos de helio no tienen hambre y están del mismo humor un lunes o un viernes.

Esta precisión es lo que hace que la física tenga tanto éxito, pero también lo que la hace tan difícil. Para los no

iniciados, una gran cantidad de ecuaciones puede hacer que parezca inaccesible, pero manejarlas es cuestión de formación y habituación. Entender las matemáticas no es lo que hace que la física sea difícil. La verdadera dificultad estriba en encontrar las matemáticas adecuadas. No puedes coger cualquier cosa que parezca matemática y denominarlo teoría. Es la exigencia de que una nueva teoría tiene que ser coherente, tanto internamente como desde el punto de vista experimental —con todos y cada uno de los experimentos— lo que la hace tan complicada.

La física teórica es una disciplina muy desarrollada. Las teorías con las que trabajamos actualmente han superado una enorme cantidad de pruebas experimentales. Y, a medida que las teorías han ido superando nuevas pruebas, se hace un poco más difícil mejorar alguno de sus aspectos. Una teoría nueva debe contener todos los éxitos de las teorías actuales y ser un poco mejor que ellas.

Mientras los físicos desarrollaban teorías para explicar experimentos existentes o futuros, el éxito consistía en obtener los números correctos con el mínimo esfuerzo. Sin embargo, cuantas más observaciones podían describir nuestras teorías, más difícil se hacía probar cada mejora planteada. Tuvieron que pasar veinticinco años desde la predicción del neutrino hasta su detección, casi cincuenta para confirmar la existencia del bosón de Higgs y cien para detectar directamente las ondas gravitacionales. Ahora, el tiempo necesario para probar una nueva ley fundamental de la naturaleza puede ser más largo que toda la carrera de un científico. Esto obliga a los teóricos a recurrir a criterios que no sean la adecuación empírica para decidir qué vías de investigación tomar. El atractivo estético es uno de ellos.

En nuestra búsqueda de nuevas ideas, la belleza desempeña muchos papeles. Es una guía, una recompensa y una motivación. También es un sesgo sistemático.



Los trabajadores de la empresa de mudanzas han recogido mis cajas, muchas de las cuales no me molesté nunca en desembalar, sabedora de que no me quedaría aquí. Ecos de mudanzas anteriores surgen de armarios vacíos. Llamo a mi amigo y colega Michael Krämer, profesor de física en Aquisgrán, Alemania.

Michael trabaja en la supersimetría, «SUSY» para abreviar. SUSY predice un gran número de partículas elementales todavía sin descubrir, una compañera de cada una de las partículas conocidas y unas cuantas más. Entre las nuevas leyes de la naturaleza planteadas, SUSY es actualmente la más popular. Miles de mis colegas han apostado sus carreras a ella. Pero, hasta ahora, no se ha visto ninguna de esas partículas nuevas.

«Creo que empecé a trabajar en SUSY porque en ella trabajaba la gente en mi época de estudiante, a mediados y finales de los años noventa», dice Michael.

Las matemáticas de SUSY son muy parecidas a las de las teorías establecidas, y el programa estándar de física es una buena preparación para que los estudiantes trabajen en SUSY. «Es un marco muy bien definido; fue fácil», dice Michael. Fue una buena elección. Michael obtuvo una plaza en 2004 y ahora dirige el grupo de investigación del grupo New Physics en el Gran Colisionador de Hadrones, financiado por la Fundación Alemana de Investigación.

«También me gusta la simetría. Eso hizo que me pareciera atractiva.»

Como he señalado, en nuestro intento de entender de qué está hecho el mundo, hemos descubierto veinticinco partículas elementales diferentes. La supersimetría completa esta colección con un conjunto de partículas compañeras toda-

vía por descubrir, una por cada una de las conocidas y algunas adicionales. Esta finalización supersimétrica es atractiva porque las partículas conocidas son de dos tipos diferentes, fermiones y bosones (cuyos nombres proceden de Enrico Fermi y Satyendra Bose, respectivamente), y la supersimetría explica cómo esos dos tipos están hechos el uno para el otro.

Los fermiones son extremadamente individuales. Por mucho que lo intentes, no lograrás que dos de ellos hagan lo mismo en el mismo lugar; siempre tiene que haber una diferencia entre ambos. Los bosones, por su parte, no tienen esa limitación y están encantados de unirse unos a otros en una danza común. Por eso los electrones, que son fermiones, se sitúan en capas separadas alrededor del núcleo del átomo. En cambio, si fueran bosones se situarían juntos en la misma capa, dejando el universo sin química (y sin químicos, ya que nuestra propia existencia se basa en la negación de los pequeños fermiones a compartir el espacio).

La supersimetría postula que las leyes de la naturaleza permanecen inalterables cuando los bosones se intercambian por fermiones. Esto significa que cada bosón conocido tiene que tener un compañero fermiónico y que cada fermión conocido debe tener un compañero bosónico. Pero, aparte de diferir en cuanto a su afiliación fermiónica o bosónica, las partículas compañeras deben ser idénticas.

Dado que ninguna de las partículas conocidas concuerda tal como se requiere, hemos llegado a la conclusión de que no existen parejas supersimétricas entre ellas. Por el contrario, tiene que haber nuevas partículas a la espera de ser descubiertas. Es como si tuviéramos una colección de tarros desparejados y estuviéramos convencidos de que las tapas tienen que estar por ahí en algún sitio.

Desgraciadamente, las ecuaciones de supersimetría no nos dicen cuáles son las masas de las compañeras SUSY. Como producir partículas más pesadas requiere más energía, las partículas son más difíciles de encontrar cuando su

masa es mayor. Todo lo que hemos aprendido hasta ahora es que las supercompañeras, si existen, son tan pesadas que la energía de nuestros experimentos aun no es lo suficientemente grande para crearlas.

La supersimetría tiene mucho a su favor. Aparte de revelar que los bosones y los fermiones son dos caras de la misma moneda, SUSY también contribuye a la unificación de fuerzas fundamentales y tiene potencial para explicar diversas coincidencias numéricas. Además, algunas de las partículas supersimétricas tienen precisamente las propiedades adecuadas para crear materia oscura. Me extenderé sobre esto en los capítulos siguientes.

La supersimetría se ajusta tan cómodamente a las teorías existentes que muchos físicos están convencidos de que tiene que ser correcta. «A pesar de los esfuerzos de muchos cientos de físicos que han realizado experimentos en busca de esas partículas, jamás se han observado o detectado supercompañeras —escribe el físico de Fermilab Dan Hooper. Sin embargo—, esto apenas ha influido a la hora de disuadir a los físicos teóricos, los cuales esperan apasionadamente que la naturaleza se formule de ese modo, que sea supersimétrica. Para muchos de esos científicos, las ideas tras la supersimetría son simplemente demasiado hermosas y elegantes para no formar parte de nuestro universo. Resuelven demasiados problemas y encajan en nuestro mundo de manera demasiado natural. Para esos auténticos creyentes, las partículas supercompañeras simplemente tienen que existir.»<sup>2</sup>

Hooper no es el único que hace hincapié en la fuerza de esta convicción. «Para muchos físicos teóricos, resulta difícil creer que la supersimetría no desempeñe algún papel en la naturaleza», señala el físico Jeff Forshaw.<sup>3</sup> Y, en un artículo publicado en 2014 en *Scientific American*, titulado «Supersymmetry and the Crisis in Physics» (la supersimetría y la

crisis de la física), los físicos de partículas Maria Spiropulu y Joseph Lykken argumentan sus esperanzas de que acaben apareciendo pruebas y afirman que «no es exagerado decir que la mayoría de los físicos de partículas creen que la supersimetría *tiene* que ser verdad» (el énfasis es suyo).<sup>4</sup>

El hecho de que una simetría que relacionase bosones y fermiones se considerara imposible durante mucho tiempo porque las pruebas matemáticas parecían impedirle contribuye a aumentar el atractivo de SUSY.<sup>5</sup> Pero ninguna prueba es mejor que sus premisas. Resultó que, si se suavizan las premisas de la prueba, la supersimetría es la mayor simetría posible que puede encajar en las teorías existentes.<sup>6</sup> ¿Y cómo no iba a hacer uso la naturaleza de una idea tan hermosa?

«Para mí, el aspecto más bello de SUSY fue siempre que era la mayor clase de simetría —recuerda Michael—. Eso me resultaba atractivo. Cuando me enteré de esta excepción pensé: “Oh, es interesante”, porque esta idea (impones simetrías y encuentras las leyes correctas de la naturaleza, aunque no entiendas exactamente por qué) me parecía un principio poderoso. Así que me pareció que valía la pena seguir ese camino.»

En mi época de estudiante, a finales de la década de 1990, los modelos más sencillos de SUSY ya habían entrado en conflicto con los datos, y el proceso de diseño de modelos más complicados pero viables había empezado.<sup>7</sup> Me parecía un campo en el que no podía decirse nada nuevo sin detectar antes las anunciadas partículas. Decidí mantenerme alejada de SUSY hasta que eso sucediera.

No ha sucedido. No se encontró ninguna prueba de SUSY en el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP por sus siglas en inglés) que estuvo en funcionamiento hasta 2000. Tampoco se descubrió nada en el Tevatron, un colisionador

que alcanzaba energías más elevadas que el LEP y que funcionó hasta 2011. El aún más potente LHC, que reutilizó el túnel del LEP, funciona desde 2008, pero SUSY no ha aparecido.

Con todo, me preocupa haber cometido un gran error al no dedicarme a un campo que tantos de mis colegas consideraban, y siguen considerando, tan prometedor.

Durante muchos años, la opinión general era que algo nuevo tenía que aparecer en el LHC porque, de lo contrario, la mejor descripción existente de la física de partículas —el modelo estándar— no sería natural según las medidas introducidas por, entre otros, Gian Francesco Giudice. Esas fórmulas matemáticas para medir la naturalidad se basan en la creencia de que una teoría con cifras muy grandes o muy pequeñas no es bonita.

A lo largo de este libro analizaremos si esta creencia está justificada. De momento, basta con decir que está muy extendida. En un artículo de 2008, Giudice explicaba: «El concepto de naturalidad [...] se desarrolló a través de un impulso colectivo de la comunidad, la cual destacaba cada vez más la relevancia de la existencia de la física más allá del modelo estándar».<sup>8</sup> Y, cuanto más estudiaban la naturalidad, más se convencían de que para evitar las desagradables coincidencias numéricas se tenían que realizar pronto nuevos descubrimientos.

«En retrospectiva resulta sorprendente cuánto énfasis se puso en el argumento de la naturalidad —dice Michael—. Si miro hacia atrás, veo que la gente repetía el mismo argumento una y otra vez, sin pensar realmente lo que decía. Dijeron lo mismo durante años. Es realmente sorprendente que ese fuera el principal eje impulsor de gran parte de la elaboración de modelos. Echando la vista atrás, me resulta extraño. Sigo pensando que la naturalidad es atractiva, pero ya no estoy convencido de que señale una nueva física en el LHC.»

El LHC concluyó su primera fase en febrero de 2013 y, a continuación, dejó de funcionar para que se llevase a cabo

una actualización. La segunda fase, con energías más elevadas, se inició en abril de 2015. Ahora estamos en octubre de 2015 y en los próximos meses esperamos ver los resultados preliminares de la fase dos.

«Deberías hablar con Arkani-Hamed —dice Michael—. Es un gran defensor de la naturalidad; un tipo muy interesante, realmente influyente, especialmente en Estados Unidos. Es increíble. Trabaja en algo durante un tiempo, congrega seguidores y, al año siguiente, se dedica a otro tema. Hace diez años trabajaba en este modelo de SUSY natural y hablaba de ello con tanta convicción que todo el mundo empezó a interesarse por el tema. ¡Y ahora, diez años más tarde, escribe este artículo sobre SUSY no natural!»

Nima Arkani-Hamed adquirió notoriedad a finales de la década de los noventa por plantear, junto con Savvas Dimopoulos y Gia Dvali, que nuestro universo podría tener dimensiones adicionales, enrolladas con radios pequeños pero lo suficientemente grandes para poder probarse con aceleradores de partículas.<sup>9</sup> La idea de que existen dimensiones adicionales no es nueva; se remonta a la década de los años veinte.<sup>10</sup> La genialidad de Arkani-Hamed y sus colaboradores fue plantear que esas dimensiones eran tan grandes que podrían probarse pronto, sugerencia que inspiró a miles de físicos para realizar cálculos y publicar más detalles. El argumento de por qué el LHC debería revelar las dimensiones adicionales era la naturalidad. «La naturalidad requiere que la migración a las dimensiones adicionales no pueda posponerse mucho más allá de la escala TeV», argumentaron los autores en su primer trabajo sobre lo que ahora se conoce, a partir de sus iniciales, como el modelo ADD.\* Hasta la fecha, el estudio ha sido citado más de cinco mil veces. Eso

\* La abreviatura *eV* significa «electron volt» y es una medida de energía. Un TeV es  $10^{12}$ , o un billón de eV. El LHC puede generar como máximo unos 14 TeV. De ahí que se diga que el LHC «prueba la escala TeV».

lo convierte en uno de los artículos más citados de la historia de la física.

En 2002, después de quedarme atascada en una variante de la versión de las dimensiones adicionales de la década de los años veinte que había elegido como tema de doctorado, mi supervisor me convenció de que haría bien en cambiar a su encarnación moderna. De manera que yo también escribí algunos artículos sobre la prueba de dimensiones adicionales en el LHC. Pero el LHC no ha aportado ninguna prueba de la existencia de dimensiones adicionales. Empecé a cuestionar los argumentos de la naturalidad. Nima Arkani-Hamed pasó de las grandes dimensiones extra a la SUSY y ahora es profesor de física en el Institute for Advanced Studies de Princeton.

Tomó nota mentalmente de que tengo que hablar con Nima.

«Es mucho más difícil ponerse en contacto con él que conmigo. Creo que no responde a los correos electrónicos muy fácilmente —me dice Michael—. Dirige todo el entorno de la física de partículas de Estados Unidos. Y argumenta que necesitamos un colisionador de 100 TeV para probar la naturalidad. Y ahora quizá serán los chinos los que construyan ese colisionador; ¡quién sabe!»

A medida que se hace cada vez más claro que el LHC no aportará las esperadas pruebas de unas leyes de la naturaleza más bonitas, los físicos de partículas vuelven a depositar sus esperanzas en el próximo gran colisionador. Nima es uno de los principales defensores de la construcción de un nuevo acelerador circular de partículas en China.

Pero, independientemente de cualquier otra cosa que se descubra con energías más elevadas, el hecho de que el LHC no haya descubierto hasta la fecha ninguna nueva partícula elemental significa que la teoría correcta es, desde el punto de vista de los físicos, antinatural. Desde luego, nos hemos colocado en una situación contradictoria en la cual,

según nuestros requisitos de belleza, la propia naturaleza es antinatural.

«¿Me preocupa? No lo sé. Estoy confuso —dice Michael—. Estoy francamente confuso. Antes del LHC, pensaba que tenía que pasar algo. ¿Pero ahora? Estoy confuso.»  
Suena familiar.

#### EN RESUMEN

- Los físicos recurren mucho a las matemáticas y están realmente orgullosos de que funcionen tan bien.
- Pero la física no es matemáticas y la elaboración de una teoría necesita datos para orientarse.
- En algunos ámbitos de la física hace décadas que no hay datos nuevos.
- A falta de orientación procedente de experimentos, los teóricos utilizan criterios estéticos.
- Se sienten confundidos si eso no funciona.