

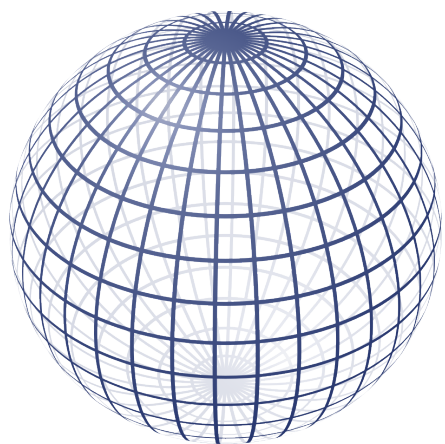
# La simetría y simplicidad de las leyes de la física y el bosón de Higgs

Juan Maldacena

Institute for Advanced Study, Princeton, NJ 08540, USA

## Abstract

Describimos las ideas teóricas, desarrolladas entre los años 1950s-1970s, que llevaron a la predicción del bosón de Higgs, la partícula que fue descubierta en 2012. Las fuerzas de la naturaleza están basadas en principios de simetría. Explicaremos la naturaleza de estas simetrías mediante una analogía económica. También discutiremos el mecanismo de Higgs, que es necesario para evitar una de las aparentes consecuencias de estas simetrías, y para explicar algunos de los aspectos de las partículas elementales.



# 1 Un cuento de hadas

Nuestra concepción de la física de partículas es como el cuento de la Bella y la Bestia. La Bella representa las fuerzas de la naturaleza: el electromagnetismo, la fuerza débil, la fuerza fuerte y la gravedad. Estas están basadas en un principio de simetría llamado simetría de medida, o simetría de “gauge” en inglés. Además, necesitamos a la Bestia, que es el llamado bosón de Higgs. Este contiene muchos de los aspectos misteriosos y extraños (algunos dirían “feos”) de la física de partículas. Pero necesitamos ambos para describir la naturaleza. Somos los hijos de este matrimonio entre la Bella y la Bestia.

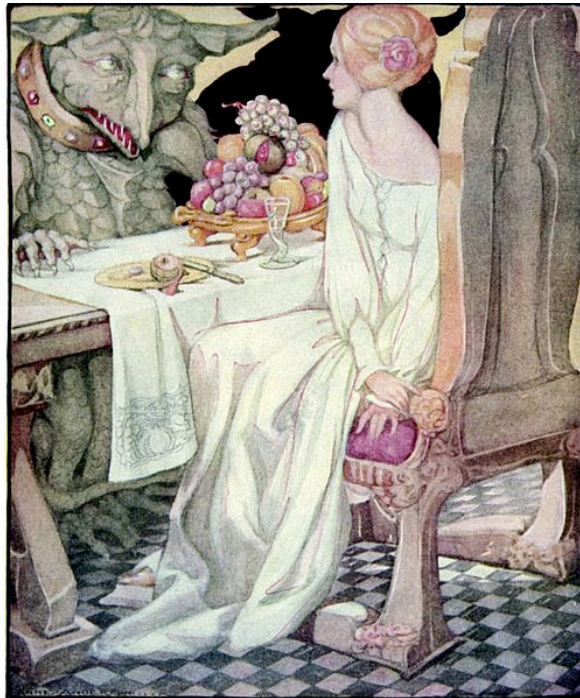


Figura 1: La física de partículas es como el cuento de la Bella y la Bestia. Las cuatro fuerzas de la naturaleza son la Bella y el bosón de Higgs es la Bestia.

Aquí trataremos de introducir a estos dos actores principales: a la Bella o el principio de simetría de medida y a la Bestia o el mecanismo de Higgs. Haremos esto mediante analogías. Ha habido muchos intentos de explicar la física de partículas para el público general. Las exposiciones usuales llevan al lector a través de un largo camino que parte del mundo de la experiencia ordinaria, a través de la moléculas, núcleos, etc., usualmente siguiendo el orden histórico de los descubrimientos. Aquí trataremos algo diferente, nos lanzaremos en paracaídas hacia la descripción moderna. Nos encontraremos en un lugar como de hadas, con reglas muy sencillas. El objetivo principal es enfatizar el rol de las simetrías de medida y resaltar la simplicidad sorprendente de estas leyes. Estas son las leyes del “Modelo Estándar” de la física de partículas. Son sorprendentemente simples dado

que son la explicación última de la gran mayoría de los fenómenos ordinarios. Describen al universo desde que tenía un milisegundo hasta ahora. También describen casi toda la materia conocida (la materia oscura es la excepción). Esta descripción de la materia es el resultado de una ardua exploración experimental que no describiremos aquí, pero puede ser encontrada en muchas de las descripciones de la física de partículas para público general.

## 2 Simetría

### 2.1 Simetrías ordinarias

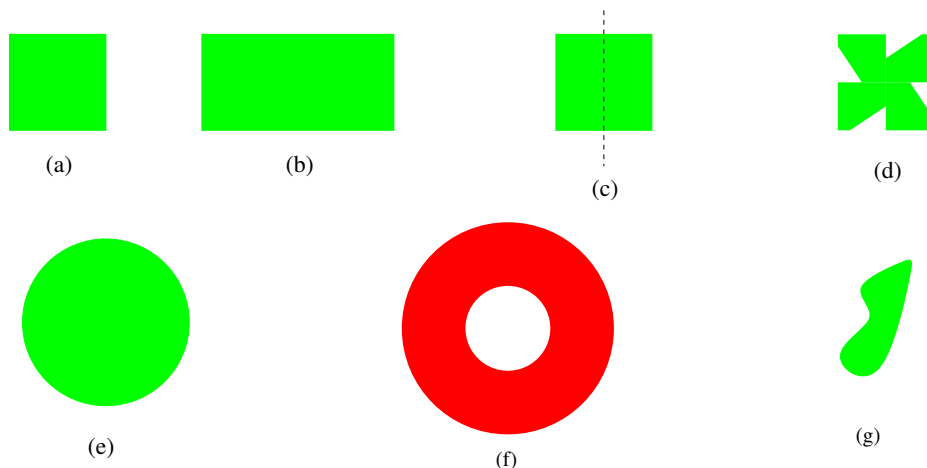


Figura 2: Figuras con distintas simetrías. (a) El cuadrado es simétrico bajo rotaciones de 90 grados. (b) Este rectángulo es solo simétrico bajo rotaciones de 180 grados. (c) el cuadrado también es simétrico ante una reflexión a lo largo de la línea punteada. (d) Esta figura no es simétrica bajo ninguna reflexión. Sin embargo, es simétrica bajo rotaciones de 90 grados. (e) Este círculo puede ser rotado por cualquier ángulo. (f) Este anillo tiene las mismas simetrías que el círculo. (g) Esta figura no tiene ninguna simetría.

Primero hablemos un poco sobre la noción de simetría. La simetría en la física es exactamente la misma noción de simetría que usamos en nuestro lenguaje de todos los días. Es una transformación que no cambia a un objeto. Por ejemplo, un cuadrado se puede rotar por 90 grados y queda igual. Si tuviéramos un rectángulo esto no sería así. Vea la figura 2. El rectángulo se puede rotar por 180 grados sin que cambie. Dos figuras diferentes pueden tener las mismas simetrías. Puede ocurrir que uno sepa las simetrías de un objeto pero que uno no sepa exactamente de qué objeto se trata. Muchas veces esto es suficiente para hacer predicciones. Por ejemplo, podemos tener un objeto que es simétrico bajo rotaciones, con las mismas simetrías que un círculo. Entonces sabemos que este objeto rotaría uniformemente sobre una mesa. Podría ser un cilindro hueco o uno sólido,

ambos rotarían uniformemente sobre una mesa. Por supuesto, en otras circunstancias se comportarían en forma distinta. Por ejemplo, uno puede flotar en el agua y el otro no.

Las simetrías de las cuales hablaremos son una generalización de estas simetrías más familiares. Sus consecuencias serán determinar las fuerzas de la naturaleza.

## 2.2 Recordando la electricidad y el magnetismo

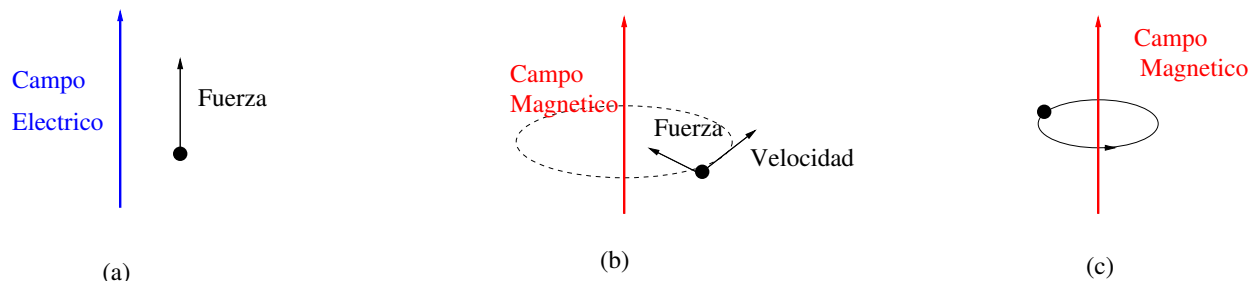


Figura 3: (a) Un campo eléctrico hace una fuerza sobre una partícula cargada a lo largo de la dirección del campo. (b) Un campo magnético ejerce una fuerza sobre una partícula cargada que se está moviendo. Esta fuerza es perpendicular a la dirección del campo y la dirección en que se mueve la partícula. (c) La partícula cargada termina moviéndose en un círculo alrededor del campo magnético.

Antes de comenzar recordemos algunos aspectos del electromagnetismo. Uno postula la existencia de campos eléctricos y magnéticos. Podemos pensarlos como pequeñas flechas en cada punto del espacio-tiempo. Sentimos su presencia a través de sus efectos sobre las partículas cargadas. Los campos eléctricos actúan sobre las partículas cargadas empujándolas a lo largo de la dirección del campo. Los campos magnéticos sólo actúan sobre las partículas que se mueven. En la presencia de un campo magnético una carga que se mueve siente una fuerza que actúa en forma perpendicular a la dirección de movimiento. Entonces si usted fuera una partícula cargada que se está moviendo hacia adelante en un campo magnético vertical, entonces sentiría una fuerza que lo empuja para el costado. Si no hubiera otras fuerzas usted terminaría moviéndose en una trayectoria circular. Vea la figura 3. En resumen, las partículas cargadas se mueven en un círculo alrededor de los campos magnéticos.

Estos campos eléctricos y magnéticos tienen su propia dinámica. Hay ondas electromagnéticas, que son oscilaciones coordinadas de campos eléctricos y magnéticos. Estas se pueden propagar en el vacío. Estas son las ondas de radio, la luz, los rayos X, los rayos gamma, etc. Con suerte, todo esto sería familiar para usted. Pero no se desespere, no será necesario saber los detalles de las ecuaciones del electromagnetismo para entender lo que sigue. Todo lo que necesita saber es que existen campos eléctricos y magnéticos que existen en el espacio vacío. Estos actúan sobre las partículas cargadas y

afectan su movimiento. Los campos eléctricos las empujan a lo largo de la dirección del campo eléctrico. Las partículas cargadas se mueven en círculos alrededor de los campos magnéticos.

## 2.3 La simetría de medida

El electromagnetismo se puede pensar como una “teoría de medida”. Este es otro punto de vista sobre el electromagnetismo. Es un punto de vista particularmente útil para generalizarlo a las otras fuerzas. También es útil para describir la versión cuántica. Para explicar qué es una simetría de medida es conveniente introducir una analogía económica\*. En esta analogía económica haremos algunas simplificaciones e idealizaciones. Recuerde que nuestro objetivo *no* es explicar la economía del mundo real. Nuestro objetivo es explicar el mundo físico real. La buena noticia es que el modelo es mucho más sencillo que la economía real. Por eso la física es más sencilla que la economía!

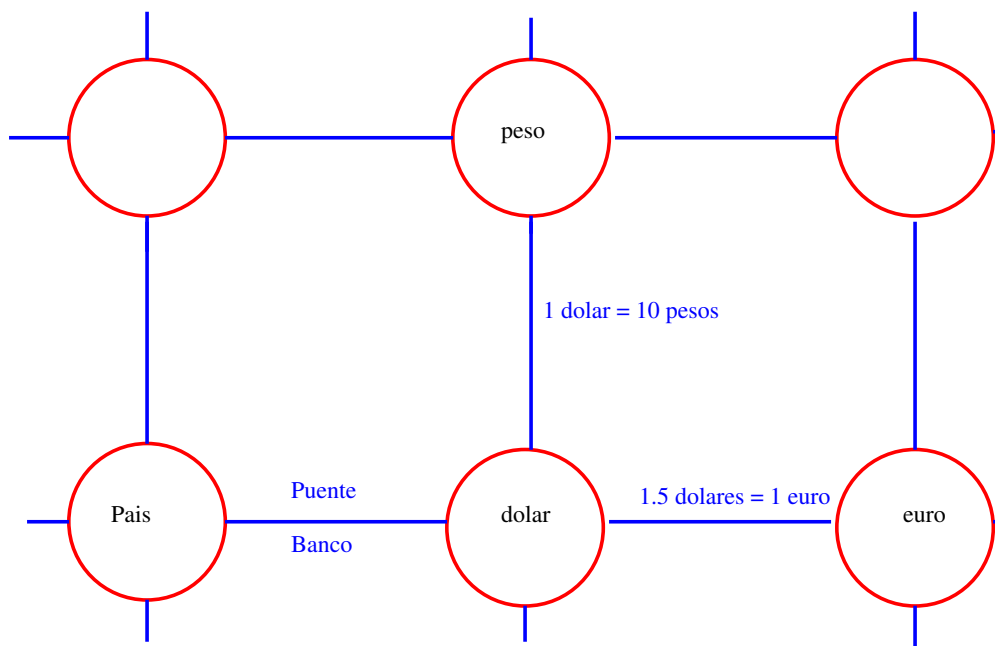


Figura 4: Cada círculo es un país que tiene su propia moneda. Están conectados por puentes azules. En estos puentes hay un banco. Cuando uno cruza un puente uno tiene que cambiar todo su dinero a la moneda del nuevo país. Indicamos algunas de las monedas y de los tipos de cambio. En cada puente hay un tipo de cambio independiente de los demás.

---

\*La analogía entre los cambios de moneda y las teorías de medida sobre redes fue notada en K. Young, “Foreign exchange market as a lattice gauge theory”, American Journal of Physics 67, 862 (1999). Aquí extenderemos esa descripción, con el objetivo físico en mente.

Bueno, veamos cómo es el modelo económico. Imaginemos que tenemos muchos países. Cada país tiene su propia moneda. Imaginemos que los países están ordenados en una red regular en un mundo plano. Vea la figura 4. Cada país está conectado con sus vecinos mediante un puente. En cada puente hay un banco. En estos bancos uno debe cambiar el dinero que lleva a la nueva moneda, a la moneda del país al cual uno está cruzando. Hay un banco independiente en cada puente. No hay ninguna autoridad central que coordine los tipos de cambio entre los países. Cada banco es autónomo y pone el tipo de cambio en forma arbitraria. Los bancos no cobran comisión por cambiar el dinero. Por ejemplo, asumamos que la moneda del país inicial es el dólar y que la del país a donde uno va es el euro. Supongamos que el tipo de cambio del banco que está entre estos dos países es de  $1,5 \text{ dólares} = 1 \text{ euro}$ . Vea la figura 4. Entonces si usted tiene 15 dólares, el banco se lo convierte a 10 euros cuando usted cruza la frontera. Si decide volver, entonces sus 10 euros serán convertidos en 15 dólares. Por lo tanto, si usted va al país vecino y vuelve al país original, entonces quedará con la misma cantidad de dinero que tenía al principio. No gana ni pierde. Otra regla es que uno sólo puede ir de un país al país vecino. De allí uno puede continuar a cualquiera de los nuevos países vecinos, etc. Sin embargo, uno no puede tomar un avión que lo lleve a un país distante sin pasar por todos los países intermedios. Sólo se puede caminar de un país al siguiente, cruzando los distintos puentes y cambiando el dinero a las monedas correspondientes de cada país intermedio. Finalmente, la última suposición es que lo único que uno puede llevar de un país a otro es dinero. No puede llevar oro, ni plata, ni ningún otro producto. Más tarde vamos a permitirlo, pero por ahora analizaremos esta situación más simple.

Repasemos las suposiciones nuevamente. Tenemos países organizados en una grilla. Cada país tiene su propia moneda. Hay puentes que conectan a cada país con sus vecinos. Hay un banco en cada puente que cambia las monedas. Los bancos eligen los tipos de cambio que quieren y no cobran comisión. Solo se puede llevar dinero de un país al otro, lo cual es muy sencillo. Lo único que usted puede hacer es viajar entre los distintos países llevando dinero y cambiándolo cada vez que cruza una frontera.

¿Dónde está la simetría? La simetría de medida es la siguiente. Imagine que uno de los países ha acumulado muchos ceros en su moneda y quiere eliminarlos. Esto es muy común en algunos países con inflación alta. Lo que ocurre es que un día el gobierno local decide que va a cambiar las unidades de su moneda. Por ejemplo, en lugar de usar pesos ahora todos van a usar “Australes”. El gobierno declara que 1000 pesos va ser lo mismo que un Austral, ó  $1000 \text{ pesos} = 1 \text{ Austral}$ . Entonces todos cambian los precios y los tipo de cambio acordemente. Si antes tenía que pagar 5000 pesos por una banana ahora tendrá que pagar 5 Australes. Si su salario era un millón de pesos, ahora será mil australes. Supongamos que el país vecino es Estados Unidos. Si el tipo de cambio eran  $3000 \text{ pesos} = 1 \text{ dólar}$ , entonces ahora sera  $3 \text{ Australes} = 1 \text{ dólar}$ . Vea la figura 5. Llamamos a esto una “simetría” porque luego de esta transformación nada realmente cambia. Nadie va a ser mas rico ni más pobre. Este cambio no ofrece ninguna oportunidad económica. Se hace puramente por conveniencia. Puede ver este tipo de simetría de medida en acción en algunos billetes de Argentina en la figura 6. Se llama simetría de “medida” porque es

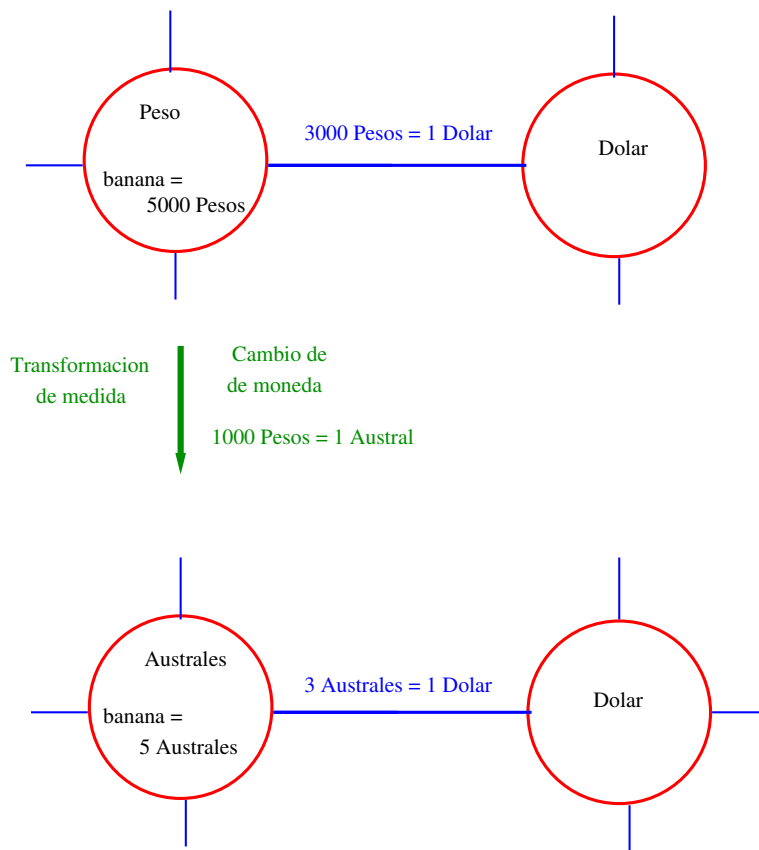


Figura 5: Cada país puede cambiar sus unidades monetarias. Aquí vemos que el país que usa Pesos cambia su moneda a Australes de modo que  $1000 \text{ Pesos} = 1 \text{ Austral}$ . Todos los precios y los tipos de cambio cambian acordemente. Aquí indicamos cómo el precio de una banana cambiaría. También indicamos cómo el tipo de cambio a uno de los países vecinos cambia. Por supuesto, todos los tipos de cambio con todos los vecinos cambian.

una simetría de las unidades que uno usa para “medir” el valor de distintos productos.

Esta simetría es “local”, ya que cada país puede decidir implementarla localmente, independientemente de lo que hagan los países vecinos. Algunos países pueden querer hacerlo más que otros. En el mundo real, Argentina ha eliminado trece ceros de su moneda mediante varias “transformaciones de medida” desde los años 1960s. Así que un peso de hoy en día  $= 10^{13} = 10.000.000.000.000$  pesos de 1960.

Ahora hablemos de los especuladores. Un especulador es alguien que viaja entre los distintos países cambiando su moneda. Su objetivo es ganar dinero. El querrá viajar a lo largo del recorrido que le haga ganar más dinero. Recuerde que con nuestras reglas él tiene que viajar entre los distintos países. No se puede sentar en un escritorio y ordenar transacciones en una computadora.

¿Cree usted que podría ganar dinero en este mundo? ¿Piense un poco, ¿qué es lo que





Figura 6: Una simetría de medida en acción. Aquí vemos un cambio en el mundo real entre pesos argentinos y Australes.

trataría de buscar?

A primera vista parecería que uno no puede ganar dinero. Ya habíamos visto que si uno va al país vecino y luego regresa al original uno termina con la misma cantidad de dinero. Sin embargo, es posible ganar dinero si uno vuelve por otro camino.

Para poner un ejemplo, consideremos tres países: Estados Unidos, Europa y Argentina, cada uno con sus respectivas monedas, dólares, euros y pesos. Ahora imaginemos que cada uno de estos países se conectan por medio de puentes. Vea la figura 7. Los tipos de cambio son los siguientes:

$$1,5 \text{ dólares} = 1 \text{ euro}, \quad 1 \text{ dólar} = 10 \text{ pesos}, \quad 1 \text{ euro} = 10 \text{ pesos}$$

En una situación así la pregunta es si se puede ganar dinero. Piénselo antes de seguir leyendo. ¡Vale la pena el esfuerzo!

Podríamos ganar dinero de la siguiente manera. Empezamos en Argentina con 10 pesos. Vamos a Europa y lo cambiamos por 1 euro. Vamos a Estados Unidos y lo cambiamos por 1.5 dólares. Luego volvemos a Argentina y lo cambiamos por 15 pesos. Empezamos con diez y terminamos con quince pesos. La ganancia en este circuito es un factor 1.5, o una ganancia de 50%. Si empieza el circuito con  $X$  pesos, usted tendrá  $1.5 \times X$  al final. Este factor es independiente de la unidad de la moneda. Si el gobierno de Argentina cambia la moneda de pesos a australes, la ganancia en el circuito se mantiene, sigue siendo un factor de 1.5.

Usted podría creer que los bancos son incompetentes al fijar un tipo de cambio “equivocado” y que los especuladores se aprovechan de ellos. Bueno, esto es así de acuerdo con las reglas establecidas. Los bancos fijan el tipo de cambio que quieren. Dependiendo de las



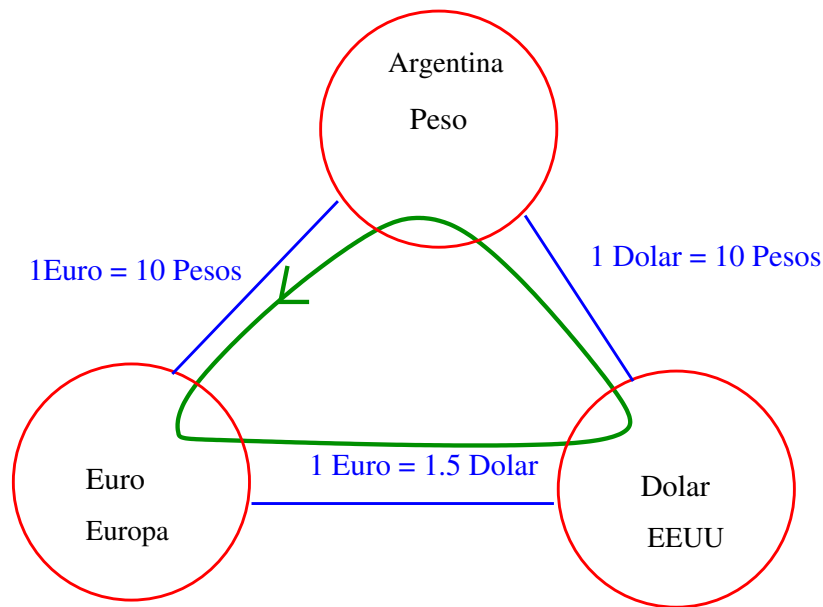


Figura 7: Aquí vemos tres países con sus respectivas monedas. En los puentes azules vemos los tipos de cambio correspondientes. Si usted sigue el circuito a lo largo de la línea verde, usted puede ganar dinero. Tendría una ganancia de un factor de 1,5 ó un 50% .

decisiones que se tomen, con algunas habrá oportunidades para especular y con otras no. Los especuladores tienen una mentalidad muy simple, únicamente se preocupan por ganar dinero y tomarán el camino que les genere más. En la situación anterior los especuladores se moverán en círculos de Argentina, a Europa, a Estados Unidos y de vuelta a Argentina. Seguirán la línea verde en la figura 7.

Ahora bien, en la física los países son equivalentes a puntos, o pequeñas regiones en el espacio. Los tipos de cambio son una configuración de los potenciales magnéticos a través del espacio. Una situación como la de la figura 7, donde se puede ganar dinero, se denomina campo magnético. El monto de la ganancia está relacionado con el campo magnético. Los especuladores son los electrones o partículas cargadas. En la presencia de campos magnéticos, simplemente se mueven en círculos para poder ganar dinero. De hecho, el monto total de ganancia alrededor del circuito es el flujo del campo magnético a través del área comprendida dentro del círculo. Ahora imagine que usted es un especulador que tiene deuda en lugar de dinero. En ese caso usted iría alrededor en dirección opuesta. Sus deudas se reducirían en la misma proporción. En el ejemplo de la figura 7 sus deudas se reducirían por un factor de  $1/1.5$  por circular en dirección opuesta a la flecha verde. En la física tenemos positrones, que son partículas como el electrón pero con carga opuesta. Y efectivamente, en un campo magnético los positrones circulan en dirección opuesta a los electrones.

En la física, nos imaginamos que esta situación hipotética de intercambio de moneda

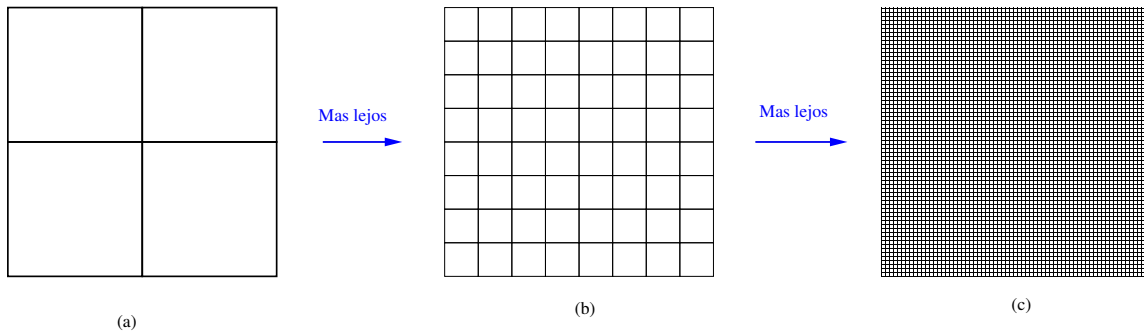


Figura 8: Aquí vemos la grilla de países a distintas escalas. Estamos alejándonos cuando vamos de (a) hasta (c). Si nos alejáramos lo suficiente veríamos a la grilla como algo continuo.

entre los países está sucediendo a distancias muy pero muy pequeñas, mucho más pequeñas que las que podemos medir hoy en día. Cuando vemos cualquier sistema físico, incluso el espacio vacío, estamos viendo a todos estos países desde muy lejos, así que se ven como un continuo. Vea la figura 8. Cuando un electrón se mueve en el vacío, se está moviendo continuamente de un punto al siguiente en el espacio-tiempo. En la descripción más microscópica, estaría constantemente moviéndose entre los países, cambiando la moneda, y haciéndose más rico en el proceso. En la física no sabemos si hay una estructura discreta como los países que hemos descrito. Sin embargo, cuando hacemos cálculos en teoría de campos de medida frecuentemente asumimos una estructura discreta como esta y luego tomamos el límite continuo cuando todos los países están muy cerca entre sí.

El electromagnetismo está basado en una simetría de medida similar. De hecho, en cada punto del espacio-tiempo la simetría corresponde a la simetría de rotación de un círculo. Una forma de ilustrar esto es imaginarse que en cada punto del espacio-tiempo tenemos un círculo extra, una dimensión extra. Vea la figura 9. El “país” que está localizado en cada punto del espacio-tiempo elige de manera independiente una manera de definir ángulos en este círculo extra. Más precisamente, cada “país” elige un punto en el círculo que llama “ángulo cero” y luego describe la posición de cualquier otro punto en términos del ángulo relativo a este punto. Esto es como elegir la moneda en el ejemplo económico. Ahora bien, en la física, no sabemos si el círculo es real. No sabemos si efectivamente hay una dimensión extra. Todo lo que sabemos es que la simetría es similar a la simetría que tendríamos si hubiera una dimensión extra.

En la física no nos gusta hacer suposiciones. Una dimensión extra no una suposición necesaria, únicamente la simetría lo es. Además las únicas cantidades relevantes son los potenciales magnéticos que nos indican cómo la posición de la partícula cambia en el círculo extra cuando viajamos de un punto al punto vecino en el espacio-tiempo.

En el electromagnetismo los campos eléctricos y magnéticos se rigen por algunas ecuaciones, las llamadas ecuaciones de Maxwell. En la analogía económica esto sería equivalente a un requisito en los tipos de cambio. En el modelo económico podemos entender

intuitivamente este requisito de la siguiente manera. Imaginemos que tenemos una configuración con tipos de cambio genéricos. Los especuladores empiezan a llevar dinero entre los países. Supongamos que nos enfocamos en un puente en particular, donde un determinado banco tiene su sede. Allí habrá especuladores cruzando el puente en ambas direcciones. Sin embargo, si hay más especuladores yendo en una dirección que en la otra, el banco podría quedarse sin alguna moneda. Por ejemplo, considere el banco que se encuentra en el puente que conecta pesos a dólares. Si hay más especuladores queriendo comprar dólares que especuladores queriendo comprar pesos, el banco se quedará sin dólares. Si esto pasara en el mundo real, el banco ajustaría el tipo de cambio para que hubiera menos especuladores queriendo comprar dólares. De hecho, si asumimos que el número de especuladores siguiendo un circuito particular es proporcional a la ganancia que obtendrían en ese circuito, entonces uno encuentra que la condición para que los bancos no se queden sin moneda, o que el flujo de moneda a través de cada puente sea cero, es equivalente a las ecuaciones de Maxwell. El lector que tenga inclinación matemática puede encontrar las derivaciones en el apéndice.

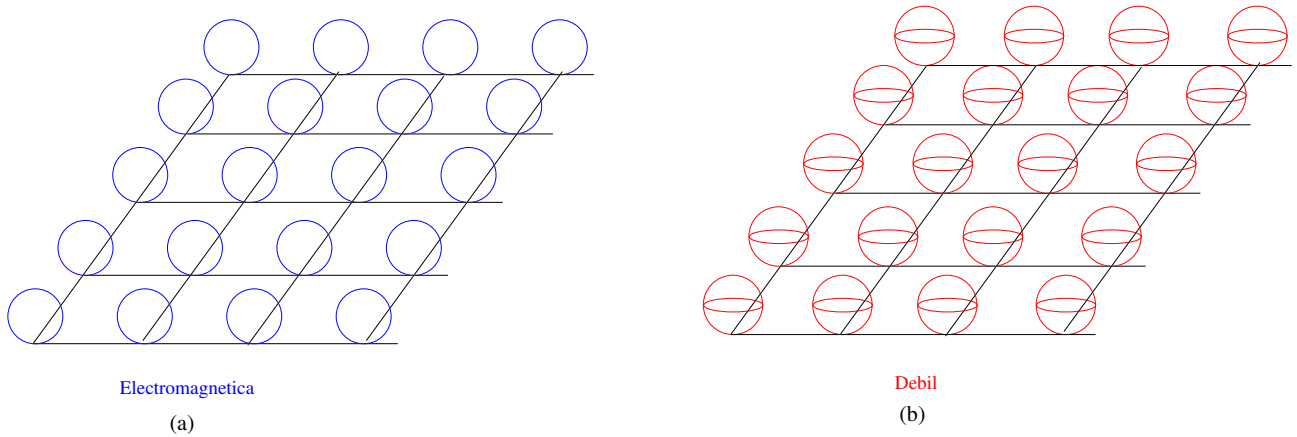


Figura 9: (a) La interacción electromagnética tiene las mismas simetrías que las de un círculo en cada punto del espacio-tiempo. Aquí cada punto del espacio-tiempo es donde las líneas negras se cruzan. Podemos pensar en el círculo como una dimensión extra. (b) La fuerza débil tiene las mismas simetrías que una configuración donde tenemos una esfera en cada punto del espacio-tiempo. No sabemos si los círculos o las esferas en realidad existen como dimensiones extras. Lo que sí sabemos es que la simetría de medida es la misma que la que habría si existieran. Los círculos o las esferas son útiles para visualizar la simetría, pero sólo pensamos en su simetría y nos concentramos en los “tipos de cambio”.

## 2.4 La fuerza débil

Ahora enfoquémonos en la fuerza débil. Es la fuerza responsable de los decaimientos radioactivos. Por ejemplo, un neutrón libre (afuera del núcleo) decae a un protón, a

un electrón y a un neutrino, en aproximadamente 15 minutos. Esto es un decaimiento muy lento comparado a otros procesos que pasan en escalas de tiempo microscópicas. La fuerza débil no es demasiado relevante en nuestra vida diaria. Sin embargo, a pesar de su debilidad, juega un papel importante en la historia del universo. Principalmente en la síntesis de los elementos químicos en las estrellas. De hecho, todos los elementos químicos alrededor nuestro, con excepción del hidrógeno y helio, fueron “cocinados” en las estrellas. La fuerza débil juega un papel crucial en este proceso. Más cerca de casa, podríamos decir que la fuerza débil puede mover montañas. De hecho, los decaimientos débiles dentro de la tierra son parcialmente responsables de mantener la tierra caliente, que en consecuencia mueve los continentes creando montañas.

La fuerza débil también puede entenderse utilizando la teoría de medida. En este caso, en cada punto del espacio tenemos las simetrías de una esfera; llamémosla esfera débil. Vea la figura 9. No sabemos si la esfera es real o no. Lo que sí sabemos es que cuando vamos de un punto en el espacio a otro debemos especificar tres “tipos de cambio”. Necesitamos tres cantidades ya que tenemos que especificar un eje de rotación (dos cantidades) y un ángulo de rotación alrededor del eje (la tercera cantidad). De tal manera que en lugar de un campo magnético tenemos tres diferentes tipos de campos magnéticos. Son ecuaciones, similares a las del electromagnetismo, que rigen el comportamiento de estos campos magnéticos junto a los eléctricos correspondientes. Estas ecuaciones fueron propuestas originalmente por Yang y Mills en 1954. Cuando Pauli las escuchó se opuso enfáticamente. Pauli afirmó que la teoría de Yang-Mills implicaba que habría nuevas partículas sin masa, las cuales no se observan en la naturaleza. Esta era una teoría bella destruida por un hecho horrible.

## 2.5 ¿Por qué partículas sin masa?

Para poder entender la objeción de Pauli, debemos enfocarnos primero en las propiedades de las ondas. En estos sistemas tenemos ondas con diferente longitud de onda. La longitud de una onda es la distancia entre dos máximos sucesivos de la onda. En los sistemas físicos a menudo uno está interesado en el costo energético de excitar ondas de distinta longitud de onda. Para una onda con determinada amplitud este costo energético depende de la longitud de onda. Para una onda electromagnética, este costo de energía decrece cuando hacemos la onda más y más larga. Resulta que la masa de la partícula está relacionada al costo de energía necesario para excitar una onda con longitud de onda muy larga. Esto está relacionado con la famosa fórmula  $E = mc^2$ . Desafortunadamente yo no he encontrado una manera corta de explicar esto, así que tendrán que confiar en mi palabra. En nuestra analogía económica no hemos hablado sobre la energía. Digamos que simplemente la energía aumenta al aumentar la ganancia para los especuladores. Esto tiene sentido intuitivamente, ya que cuanto más ganen los especuladores, más difícil se vuelve para los bancos! En consecuencia, las configuraciones con menos ganancia tienen un costo de energía menor. En la figura 10 describimos una secuencia de tipos de cambio con una configuración de longitud de onda larga y otra corta. El punto crucial es que

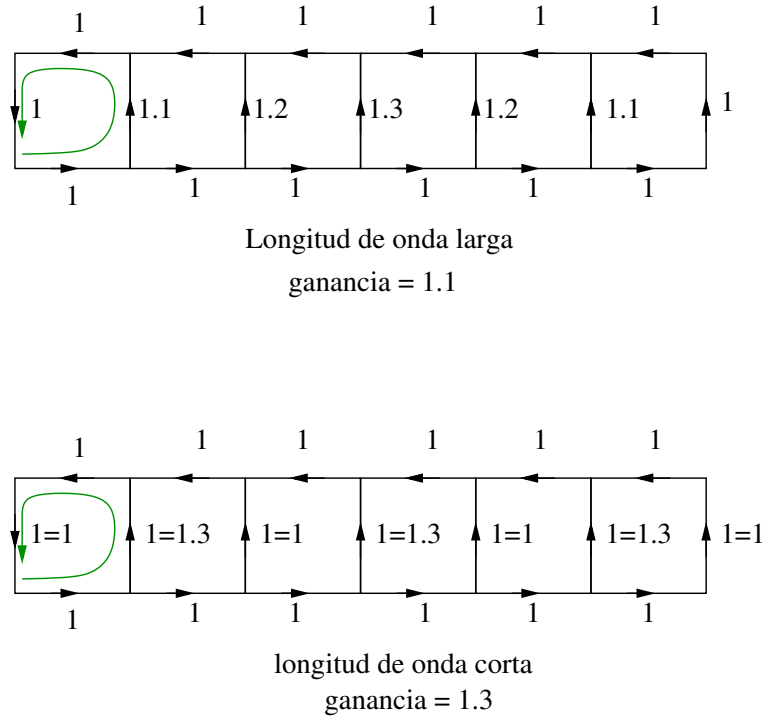


Figura 10: Podemos ver una configuración de los tipos de cambio con una longitud de onda larga o con una longitud de onda corta. La onda consiste en el hecho que los números en el centro suben y bajan al movernos de izquierda a derecha. Cada segmento es un banco situado entre dos países. Los países están en las intersecciones. El número indica el tipo de cambio cuando cruzan el puente en la dirección de la flecha. Note que la amplitud total de la onda es la misma; el tipo de cambio va entre 1 a 1.3. La ganancia obtenida al seguir un círculo cuadrado elemental, indicado por las líneas verdes, es más pequeño para la configuración con la longitud de onda larga.

la ganancia que los especuladores obtienen al seguir los circuitos cuadrados elementales (marcados con la flecha verde en la figura 10) está relacionado únicamente con la diferencia entre tipos de cambios de los países vecinos, pero no en su magnitud absoluta. Por lo tanto, cuanto más larga sea la longitud de onda, menor es la diferencia. El hecho que la ganancia se haga muy pequeña al aumentar la longitud de onda implica que la partícula asociada, el fotón, no tiene masa. Este argumento es correcto para el electromagnetismo y también es correcto para la fuerza débil por la misma razón básica. Es verdadero para la versión de la fuerza débil descrita hasta ahora ...

## 2.6 El mecanismo de Higgs

Resulta que hay un mecanismo para evitar las consecuencias del argumento anterior. Es el llamado mecanismo de Higgs, el cual ha sido propuesto por varios investigadores. Estos

incluyen a Anderson, Brout, Englert, Goldstone, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble, Nambu, etc. La historia detallada puede buscarse por separado. Aquí lo explicaremos utilizando la analogía económica. Hasta el momento hemos asumido que únicamente podemos llevar dinero entre los países. Ahora asumamos que también se permite llevar oro. De tal manera que la nueva regla es que se permite llevar oro y/o dinero entre los distintos países. El oro tiene un precio distinto en cada país el cual está fijado por los habitantes de cada país independientemente de los otros. Un especulador hábil se da cuenta de que se le abre una oportunidad. Usted puede comprar oro en un país, llevarlo al siguiente, venderlo, y traer el dinero de vuelta al primer país. Por ejemplo, si el tipo de cambio entre pesos y dólares es 4 pesos = 1 dólar, y el precio del oro en Argentina es de 40 pesos por onza y el precio en Estados Unidos es de 5 dólares por onza. ¿Qué haría? Recuerde que los precios y los tipos de cambio son:

$$4 \text{ pesos} = 1 \text{ dólar}, \quad 1 \text{ onza} = 40 \text{ pesos}, \quad 1 \text{ onza} = 5 \text{ dólares}.$$

Piénselo, no continúe leyendo hasta que tenga la respuesta. ¡Es un poco difícil pero vale la pena el esfuerzo!

Sí, efectivamente usted empezaría con cinco dólares en Estados Unidos, compraría oro allí, iría a Argentina, lo vendería por 40 pesos, volvería a Estados Unidos y obtendría 10 dólares al cruzar el puente de regreso. Esta operación tiene una ganancia con factor dos o una ganancia del 100%. Vea la figura 11.

Note que continuamos teniendo la simetría de medida. Si el gobierno argentino cambia la moneda a australes, su ganancia continuaría siendo la misma. Ahora bien, podemos usar la simetría de medida para elegir las monedas de tal forma que el precio del oro sea el mismo en todos los países. Llamaremos a las nuevas monedas: nuevos pesos y nuevos dólares. Ahora el precio del oro es 1 nuevo peso por onza y 1 nuevo dólar por onza. Sin embargo, el tipo de cambio puede no ser uno a uno. De hecho, no puede ser uno a uno si originalmente existía una oportunidad para especular. Por ejemplo en la figura 11 el nuevo tipo de cambio es 1 nuevo peso = 2 nuevos dólares. Note que esto no es el patrón oro que elimina todos los tipos de cambio. Es muy importante que los tipos de cambios permanecen presentes.

En resumen, ahora los nuevos precios y los tipos de cambio son:

$$1 \text{ nuevo peso} = 2 \text{ nuevos dólares}, \quad 1 \text{ onza} = 1 \text{ nuevo peso}, \quad 1 \text{ onza} = 1 \text{ nuevo dólar}$$

Si usted es un especulador ahora es más fácil su labor, ¿no? Con estas nuevas unidades de moneda obtenidas fijando el precio del oro en uno, se puede inmediatamente ver que si el tipo de cambio no es uno a uno, entonces hay oportunidad para especular ejecutando el circuito del oro. La oportunidad de especular permanece, y la ganancia sigue siendo de un factor dos, o 100% de ganancia. Asimismo, la ganancia neta no cambia cuando cambiamos la unidad de moneda.

Ahora, una característica esencial de este nuevo modelo económico es que la ganancia

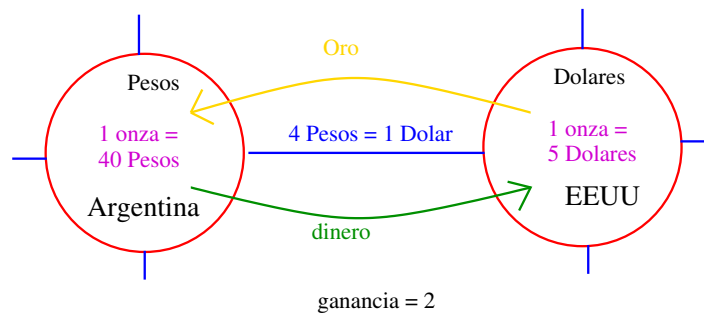


Figura 11: Aquí vemos dos países con sus respectivos precios del oro. También están los tipos de cambio entre ellos. Para estos precios y tipos de cambio es posible ganar dinero al comprar oro en Estados Unidos, llevarlo a Argentina, venderlo allí y traer el dinero de vuelta, cambiándolo en el banco por supuesto. La ganancia neta es un factor dos o 100%. El oro está en amarillo y el dinero en verde

disminuye al aumentar la longitud de onda. La razón es que ahora usted se fija si puede ganar dinero simplemente en un puente, y no necesita comparar con los puentes vecinos. Una vez que se fijó el precio del oro en uno en todas partes, entonces cualquier tipo de cambio que es diferente al uno a uno brinda una oportunidad para especular. En la versión de la física, esto significa que ahora es necesaria energía para mover cualquier tipo de cambio fuera del uno a uno. Este costo está presente incluso para configuraciones con gran longitud de onda. En la física, esto da origen a una partícula masiva, a un fotón masivo. Un mecanismo de este tipo ocurre dentro de los materiales superconductores. De hecho, esto fue una inspiración para el mecanismo de Higgs.

En la física pensamos que un mecanismo similar es el que crea la masa de las partículas que median la fuerza débil. En lugar de oro, ahora tenemos un objeto en cada país o punto en el espacio-tiempo, que tiene alguna orientación en la esfera débil. A esto se le denomina el campo Higgs. Podemos usar este objeto para fijar completamente la orientación de cada esfera débil. Ahora el objeto está orientado de la misma manera en todas partes. Esto es análogo a fijar el precio del oro a uno. Aun tenemos los “tipos de cambio” débiles que nos dicen cómo rotamos en la esfera débil cuando vamos de un país al siguiente. Esta configuración de ganancia cero se da cuando no rotamos para nada. En tal caso podemos decir que los tipos de cambio débiles son “uno a uno”. Si rotáramos de cualquier forma habría posibilidad de especular. En consecuencia, los mediadores de la fuerza débil son masivos. De esta manera, el héroe de esta historia, el campo Higgs, ha rescatado a la bella dama. Podemos explicar la fuerza débil utilizando la simetría de medida y al mismo tiempo evitamos partículas sin masa.



## 2.7 Pido disculpas por una simplificación excesiva

Hemos hecho una simplificación en esta descripción que puede llegar a confundir al lector atento. Hemos dado la impresión que la teoría del electromagnetismo y la fuerza débil surgen de una teoría de medida con las simetrías de un círculo y una esfera respectivamente. En la naturaleza, los bosones débiles ( $W^\pm$ ) están cargados. Un objeto cargado es uno que cambia bajo una transformación de medida. Esto sería imposible si el electromagnetismo correspondiera a un círculo completamente independiente de la esfera débil. De hecho, si bien es correcto que empezamos con las simetrías de un círculo y de una esfera, la simetría electromagnética corresponde a una combinación de la rotación en el círculo y una rotación en la esfera. Así los bosones débiles están cargados porque cuando realizamos una “transformación de medida” electromagnética también estamos realizando una rotación en la esfera débil y en consecuencia no es de extrañar que transformemos los bosones débiles. De la misma manera, veremos más adelante que el electrón y el neutrino representan la misma partícula pero rotando en diferentes direcciones en la esfera débil. Sin embargo, el electrón y el neutrino tienen cargas distintas. El neutrino, tal y como su nombre lo indica, es *neutro*, sin carga, mientras que el electrón tiene carga eléctrica. Pero como el electromagnetismo incluye una rotación en la esfera débil, la distinta rotación en la esfera débil de un electrón versus un neutrino se transforma en una carga distinta. Por esta razón la teoría completa se denomina “teoría electro débil”.

Esto es importante para que los detalles funcionen, pero lo ignoraremos en el resto de este artículo.

## 3 La mecánica cuántica

El sistema que describimos hasta ahora, usando la analogía económica, da origen a lo que normalmente se denomina una teoría clásica de campos. Un campo es una cantidad que está definida en cada punto del espacio-tiempo. Por ejemplo, el precio del oro está definido en cada país, que representa cada punto del espacio-tiempo. Similarmente los tipo de cambio tambien son campos. En cada punto del espacio tenemos un tipo de cambio por cada dimension del espacio-tiempo, ya que cada país tiene un número de vecinos que es proporcional a la dimension del espacio-tiempo.

En la fisica esto no termina aquí. La dinámica de estos campos se rige por las leyes de la mecánica cuántica. Un aspecto importante de estas leyes es que son probabilísticas. Uno pensaría que en el vacío todos estos campos serían cero. Sin embargo, esto no es cierto. Toman valores aleatorios. Todo lo que podemos decir es que se rigen por una distribución de probabilidad. En la analogía económica podemos decir que los tipos de cambio y el precio del oro son todos aleatorios. Este azar se rige por leyes muy precisas, que nos dan la forma precisa de las distribuciones de probabilidad. No daremos la fórmula precisa aquí (la puede encontrar en el apéndice), pero simplemente diremos que es menos probable encontrar configuraciones de los precios del oro y de los tipos de cambio con grandes posibilidades de especular. A la naturaleza no le gusta la especulacion. Tenemos una ley precisa para las

probabilidades, pero no podemos predecir con certeza qué configuración vamos a encontrar cuando realmente “miramos” el sistema.

Todo este azar ocurre a distancias muy pequeñas. Si seguimos un circuito muy grande que pasa por muchos países todas estas fluctuaciones se promedian y obtenemos el resultado clásico donde los campos son iguales a cero en el vacío. O son distintos de cero cuando tenemos ondas clásicas.

El costo de probabilidad que tenemos que pagar cuando consideramos tipos de cambio que llevan a grandes oportunidades de especular también está relacionado al costo energético que mencionamos hace un rato. Ambos son esencialmente lo mismo. Configuraciones con más energía son menos probables. En la naturaleza, las partículas que transmiten la fuerza débil son muy masivas. Estos se llaman “bosones  $Z$  y  $W^\pm$ ”. Pesan unas cien veces más que el protón. Esto es mucho para una partícula elemental. Su gran masa explica la debilidad de la fuerza débil. Su gran masa implica que es muy poco probable producir configuraciones en los “tipos de cambio débiles”. Por lo tanto, una partícula que interactúa sólo con la fuerza débil, como el neutrino, es muy difícil de ver. De hecho, un porcentaje de la energía del sol sale en neutrinos<sup>†</sup>. Sin embargo, no notamos estos neutrinos. Simplemente pasan a través de nosotros día y noche y no los vemos. Hacen falta grandes detectores con aparatos electrónicos muy sensibles para detectar una fracción muy pequeña de ellos.

### 3.1 El límite continuo y el bosón de Higgs

El mecanismo que describimos arriba le da una masa a las partículas que transmiten la fuerza débil, pero no explica por qué tiene que existir una nueva partícula, como el bosón de Higgs. Explicemos esto por medio de la analogía económica. Podemos fijar el precio del oro a uno en todos lados luego de elegir una unidad de moneda apropiada en cada país. Una vez que hicimos esto, las únicas variables que sobreviven son los tipos de cambio. En la física esto da origen a una partícula masiva (con espín uno), pero a ninguna otra partícula. En la física clásica, esta teoría es perfectamente consistente sin ninguna partícula extra. Pero es distinto en el caso cuántico, especialmente para el caso de la fuerza débil.

La versión cuántica del límite continuo, indicado gráficamente en la figura 8, es muy sutil. Un análisis detallado muestra que una teoría sin campos adicionales no permitiría que las partículas que median las fuerzas débiles tuvieran una masa que permanece fija al tomar el límite en que las distancias entre los países se hace infinitesimalmente pequeña. Sus masas se harían infinitas en el límite continuo del caso cuántico. Por esta razón todos esperábamos que el Large Hadron Collider descubriría nuevas partículas. La posibilidad más simple es decir que uno tiene una partícula adicional.

En la analogía económica estas nuevas partículas surgen cuando tenemos más productos que podemos llevar de un país al otro. Por ejemplo podemos tener oro y plata. La plata también tiene un precio en cada país. Los habitantes de cada país eligen el precio. En cada

---

<sup>†</sup>Esto muestra que la fuerza débil es importante para el funcionamiento del sol.

país, el precio relativo entre el oro y la plata es independiente de las unidades monetarias. En otras palabras el cociente de estos precios es independiente de la moneda. Decimos que es invariante ante la simetría de medida. Por ejemplo, si una onza de oro cuesta 2.000 pesos y una de plata cuesta 1.000 pesos entonces decimos que el oro cuesta dos veces mas que la plata. Si el gobierno decide cambiar de pesos a Australes, ahora el oro costaría 2 Australes y la plata 1 Austral. Pero el oro sigue costando dos veces más que la plata. En esta situación tenemos una cantidad que está definida en cada país que es independiente de la unidad monetaria. En la física esto da origen a una nueva partícula física. En el caso que sólo teníamos oro también teníamos una cantidad definida en cada país, que era el precio del oro. Sin embargo, esta cantidad dependía de las unidades monetarias. Conociendo sólo esta cantidad no podíamos saber si teníamos oportunidades de especular. Si tenemos oro y plata y el oro en un país cuesta dos veces más que la plata y en otro cuesta tres veces más, entonces, inmediatamente sabemos que hay una oportunidad para especular. De hecho, eligiendo las unidades monetarias apropiadamente podemos poner el precio del oro igual a uno en todos lados. Entonces es claro que no corresponde a un campo físico. Pero si hay oro y plata, podemos fijar el precio de oro a uno, pero no el de la plata al mismo tiempo. Por lo tanto, tenemos un campo físico.

Un campo adicional es la posibilidad más sencilla. De hecho, una nueva partícula fue descubierta en el Large Hadron Collider en el 2012.

A pesar de que no traté de relatar la historia de estos conceptos, no puedo resistir hacer un par de comentarios históricos. Yang y Mills inventaron su teoría basada en la simetría de medida de una esfera para describir mesones. Sin embargo, la usamos ahora para describir las interacciones débiles. Este es un ejemplo donde una buena idea no fue útil para su propósito original pero fue útil para otro problema. A pesar de que la objeción de Pauli era correcta, no era una falla fatal. Se podía arreglar de un modo relativamente simple. La matemática de las teorías de medida fue descubierta previamente por matemáticos. Inspirados por muchos experimentos y resultados parciales, la teoría de las interacciones electrodébiles fue escrita por primera vez por S. Weinberg, con contribuciones importantes de Glashow y Salam. Experimentos posteriores confirmaron esta teoría y eliminaron otras posibilidades. El experimento actual más importante es el Large Hadron Collider (gran colisionador de partículas gordas (hadron = gordo en griego)) en Europa.

Es notable la simplicidad de la física en comparación con la economía. La analogía económica lo muestra en forma clara. En la economía real uno puede comerciar con muchas cosas, no sólo oro y plata. También podemos comerciar entre todos los países al mismo tiempo. En la física sólo podemos comerciar con los vecinos. Es importante notar que el artículo de Weinberg sólo tiene tres páginas y el de Higgs dos, mientras que aquí nos llevó muchas páginas dar una explicación bastante imprecisa. Este es un ejemplo del poder de las fórmulas. Muchas veces se dice que un dibujo vale mil palabras. ¡Una fórmula vale un millón de dibujos!

Uno de los detectores del LHC se llama Atlas. En la figura (12) vemos al Atlas de la mitología que sostiene las esferas celestes. Probablemente cuando vea esta figura piense: Estos griegos, que inocentes que eran con todas esas esferas, cuanto más simple es la

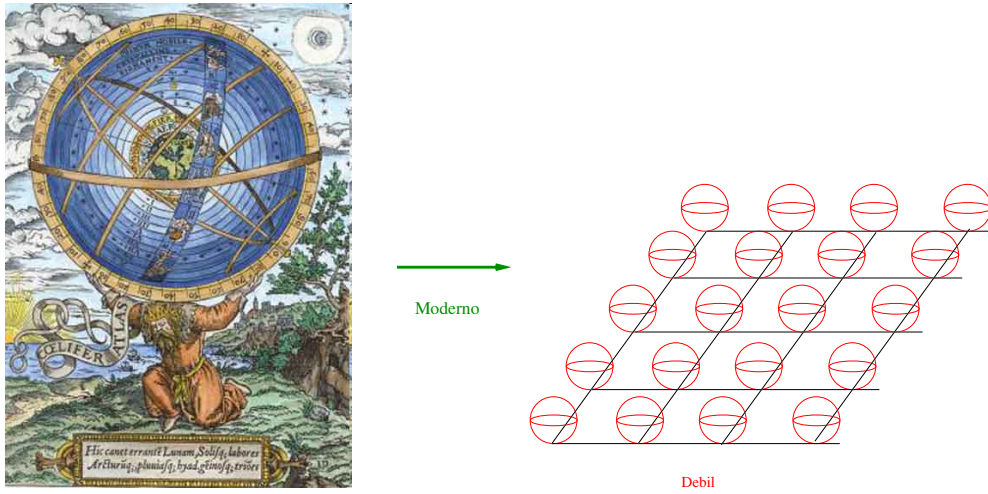


Figura 12: A la izquierda vemos a Atlas sosteniendo las esferas celestes. A la derecha vemos el conjunto de esferas cuyas simetrías determinan la fuerza débil. Los antiguos tenían unas pocas esferas por planeta. Los modernos tenemos una esfera por punto en el espacio-tiempo.

descripción de Newton. La concepción moderna de la naturaleza tiene las simetrías de una esfera en cada punto del espacio. El número de las esferas ha crecido mucho. Sin embargo, su estructura está gobernada por una simetría muy simple. La esfera débil es muy sencilla. El detector Atlas moderno esta investigando la esfera débil, descubriendo sus secretos<sup>‡</sup>.

## 4 Las masas para las otras partículas

Usualmente se dice que el campo de Higgs le da la masa a todas las otras partículas. En base a lo que dijimos hasta ahora, podríamos agregar masas para las otras partículas sin problema, con o sin el bosón de Higgs. La verdadera razón por la que necesitamos el campo de Higgs para darles masas se debe a una propiedad extraña de las interacciones débiles. Para explicar esta rareza, necesitamos describir con más detalle las propiedades de las partículas elementales. Necesitamos tomar en cuenta que el electrón puede tener una polarización, o un espín. Primero describiremos esto y luego la propiedad extraña de la fuerza débil.

Probablemente sepa que la luz puede estar polarizada y que tiene dos estados de polarización. Por ejemplo, los anteojos para sol polarizados estan diseñados para bloquear la luz predominantemente polarizada producida por la reflexion del sol. Para nuestros propósitos

---

<sup>‡</sup>Mis disculpas a los otros detectores del LHC que tienen nombres menos poéticos. Desde el punto de vista científico, son tan importantes como Atlas.

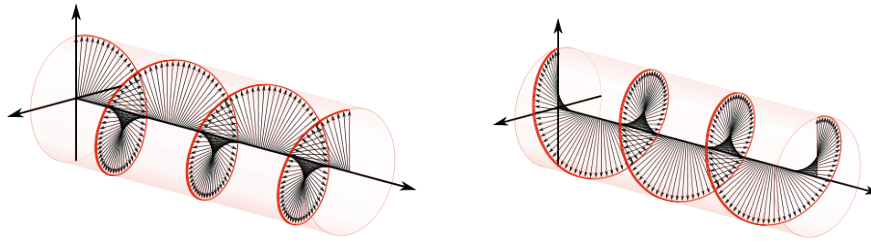


Figura 13: A la izquierda vemos una onda electromagnética polarizada en forma circular “zurda”. Las flechas señalan la dirección del campo eléctrico en un instante del tiempo. A la derecha vemos una onda “diestra”. Ahora el campo eléctrico rota en la dirección contraria. Ambas ondas se propagan hacia la derecha.

es útil pensar en términos de luz polarizada circularmente. En la figura 13 vemos una onda electromagnética “zurda” y “diestra”. Estas ondas llevan momento angular alrededor de la dirección de propagación, ya que el campo eléctrico de estas ondas rota alrededor de la dirección de propagación. En el modelo económico, el hecho de que la luz pueda estar polarizada está relacionada con el hecho de que los tipos de cambio conectan a un país con sus vecinos. Estos vecinos pueden estar en cualquiera de las direcciones transversales a la onda. En la figura 10 tenemos una onda que va hacia la derecha y vemos que los tipos de cambio que varían son los que van hacia arriba, que es una dirección transversal a la onda.

Los electrones y los neutrinos también comparten esta propiedad con la luz. También pueden estar polarizados. Pueden llevar momento angular, o una cantidad de rotación. Cuando una partícula se está moviendo, tenemos una dirección preferencial con respecto a la cual definir el momento angular. Esta dirección preferencial es la dirección de propagación. Por ejemplo, en el caso de la luz, este momento angular puede ser “zurdo” o “diestro”. Si una partícula está en reposo, sin moverse, entonces no hay ninguna dirección preferencial y el momento angular puede apuntar hacia cualquier lado. Todas las direcciones son equivalentes ya que una rotación en el espacio las relaciona.

Algo especial ocurre con partículas sin masa. Una partícula sin masa está siempre moviéndose. Si la partícula es “zurda” va a parecer “zurda” para cualquier observador, incluso los observadores que se mueven a lo largo de la dirección de movimiento. Esto no ocurre para una partícula masiva. Imagínese una partícula que se está moviendo en el espacio en la dirección vertical, hacia arriba, con el momento angular en la dirección del movimiento. Ahora decidamos que también usted se mueve en la dirección vertical pero más rápido que la partícula. En ese caso, para usted la partícula parece moverse hacia abajo, pero su polarización no cambia, su rotación no cambia. Entonces para usted el momento angular está en la dirección contraria a la del movimiento de la partícula. En otras palabras, yendo a otro sistema de referencia en movimiento hemos cambiado la dirección de la velocidad en relación con la dirección del momento angular. La conclusión es que para una partícula sin masa la noción de si el momento angular apunta en la dirección de

movimiento o en la dirección contraria es una característica de la partícula, independiente del sistema de referencia. Recuerde que el principio de relatividad nos dice que las leyes de la física deben ser independientes de cómo nos movemos.

Luego de estos comentarios preliminares, podemos hablar de la propiedad extraña de las interacciones débiles: las interacciones débiles tratan en forma distinta a las partículas zurdas de las diestras, las interacciones débiles sólo afectan a las partículas zurdas. Esta es una propiedad muy rara, que es posible sólo porque las interacciones débiles violan la simetría de reflexión en un espejo. ¿Qué es la simetría de reflexión? Es la simetría de reflexión en un espejo. Imagine que mira al mundo a través de un espejo. ¿Sería ese mundo, un mundo reflejado, consistente con las leyes de la física? Por lo que vemos en nuestra vida ordinaria pensaríamos que lo es. Es difícil darse cuenta que uno está mirando al mundo a través de un espejo. Si uno ve un texto escrito, uno puede darse cuenta, pero esto es sólo porque todos usamos la misma convención para escribir. La pregunta es si las leyes fundamentales son las mismas o no. Una propiedad importante de las reflexiones en el espejo es que la reflexión de una partícula que rota parece hacerlo en la dirección contraria. Vea la figura 14. Por lo tanto, si las interacciones débiles tratan en forma distinta a las partículas diestras y zurdas entonces las interacciones débiles pueden distinguir entre el mundo real y su reflexión en el espejo. Hemos enfatizado que las leyes de la física se basan en nuevas e interesantes simetrías, pero aquí encontramos una candidata para simetría que las leyes de la naturaleza no tienen. Las leyes de la naturaleza tienen simetrías poco familiares pero no tienen una simetría muy familiar.



Figura 14: Si la mandarina rota en la dirección de la flecha, entonces su reflexión rotaría en la dirección de la flecha reflejada. Por lo tanto, si el original rota en una dirección, entonces la imagen rota en la dirección contraria. Una mandarina puede rotar en cualquiera de estas dos direcciones. Pero si reemplazáramos a la mandarina por un neutrino moviéndose en la dirección vertical, entonces su imagen no se vería como una partícula permitida.

Un electrón zurdo y uno diestro son básicamente la misma partícula pero moviéndose en forma distinta en la esfera débil. La fuerza débil transforma uno al otro. El electrón diestro no siente la fuerza débil. No sabemos si existe un neutrino diestro, no ha sido detectado todavía, y por lo que sabemos ahora, no es necesario que exista. Esta distinción tan dramática entre partículas zurdas y diestras es posible sólo si se están moviendo a la velocidad de la luz, de tal manera que el hecho de si es diestro o zurdo es una propiedad

intrínseca de la partícula.

Sin embargo, el electrón es una partícula masiva. Esto es posible debido a su interacción con el campo de Higgs. Esta es una nueva interacción que debemos postular para obtener una teoría que esté de acuerdo con la realidad. A través de esta interacción, un electrón que se mueve a menos de la velocidad de la luz puede ser visto como una partícula que tiene una crisis de identidad. Parte del tiempo es un electrón zurdo y parte del tiempo es uno diestro moviéndose en la dirección opuesta. En promedio se mueve a menos de la velocidad de la luz. La interacción con el campo de Higgs transforma uno en otro. Vea la figura 15

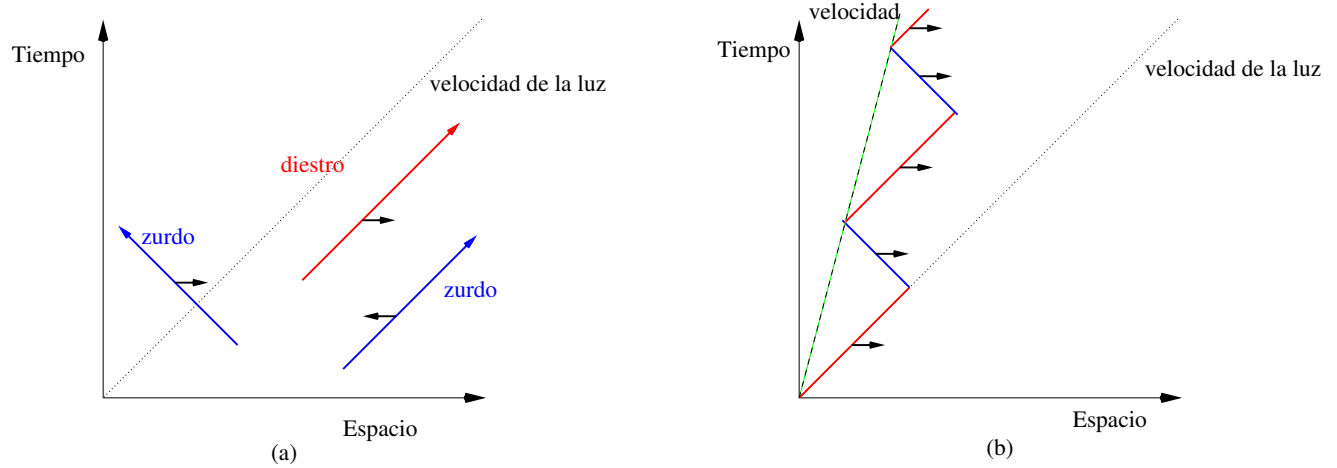


Figura 15: En (a) vemos electrones sin masa que son zurdos o diestros. La flecha negra es la dirección del momento angular del electrón. Esta puede ser diestra o zurda dependiendo de la dirección del momento angular con respecto a la dirección de movimiento. Las dos líneas azules describen electrones zurdos ya que la dirección del momento angular es opuesta a la dirección del movimiento. En (b) vemos un electrón masivo. Parte del tiempo se comporta como un electrón diestro sin masa y parte como uno zurdo sin masa. Se transforma de uno en otro a través de la interacción con el campo de Higgs.

Los quarks, que son las partículas dentro de los protones o neutrones, también adquieren su masa a través de este mecanismo. Hay otras partículas elementales similares a los electrones, neutrinos y quarks pero más masivas. Estas son inestables y decaen rápidamente por medio de la interacción débil. Todas estas partículas adquieren su masa a través del campo de Higgs. Estas interacciones se postulan arbitrariamente para que la teoría esté de acuerdo con la realidad. No son consecuencia de ningún principio de simetría conocido. La magnitud de estas interacciones es un número que toma distintos valores para las distintas partículas. Estos valores están distribuidos sobre muchos ordenes de magnitud. Por ejemplo, el quark top (el más pesado) es trescientas mil veces mas pesado que el electrón. Los neutrinos también adquieren su masa en forma similar, aunque los detalles son un poco más complicados y todavía no se ha determinado experimentalmente en forma completa.



A pesar de que el campo de Higgs da origen a la masa de las partículas elementales, la mayoría de la masa de los objetos ordinarios no viene del campo de Higgs. De hecho, la mayor parte de esta masa viene de la masa de los protones y los neutrones. Estos son objetos compuestos. Contienen quarks que se mueven muy rápidamente y la mayoría de su masa viene de la energía de este rápido movimiento. (Recuerde  $E = mc^2$ ). Una pequeña parte de su masa viene de la masa de los quarks. El campo de Higgs es importante para una propiedad macroscópica del mundo real. El campo de Higgs determina la masa del electrón, y esta masa determina el tamaño de los átomos. El tamaño de los átomos es inversamente proporcional a la masa de electrón. Si hiciéramos más liviano al electrón, el átomo se haría más grande. Cambiando la magnitud del campo de Higgs sería posible hacer todas las partículas elementales más livianas. Para una persona que trata de perder peso, no sería una buena idea tratar de cambiar la magnitud del campo de Higgs. Ignorando el hecho de que esto sería muy, pero muy difícil de hacer, no tendría el efecto deseado. El peso de la persona cambiaría muy poco, pero el tamaño de esta persona se haría mucho más grande.

Dado que el campo de Higgs hace todas estas buenas obras para nosotros, ¿por qué decimos que es feo? Una razón es que representa una nueva fuerza de la naturaleza que no está basada en una simetría de medida. Una razón más práctica es que la mayor parte de los parámetros del modelo Estándar están asociados a las interacciones con el campo de Higgs. Estos parámetros toman valores que difieren por órdenes de magnitud. En comparación, las magnitudes de las tres fuerzas de medida son bastante similares, al menos a altas energías. Finalmente, lo más extraño es el valor de la masa del bosón de Higgs, y por consecuencia, del resto de todas las masas. No está claro cuál es el origen de esta masa. Tampoco sabemos por qué esta masa es mucho más pequeña que la otra escala de masa de la naturaleza, que es la escala de masa que determina la fuerza de la gravedad. Esto puede entenderse de la siguiente manera. En el modelo económico, hemos dicho que recuperamos el límite del continuo diciendo que la distancia entre los países es mucho más pequeña que la distancia más pequeña que podemos medir. En un mundo sin gravedad esta distancia podría ser infinitesimalmente pequeña. Pero en nuestro universo tenemos la gravedad. La teoría de la gravedad de Einstein dice que el espacio-tiempo es dinámico. También esperamos que respete las leyes de la mecánica cuántica. La mecánica cuántica dice que el espacio-tiempo mismo estaría fluctuando en forma aleatoria (al azar). En el modelo económico, el espacio-tiempo es la grilla de países. Que la grilla fluctúe significa que los países pueden intercambiar vecinos, que nuevos países pueden aparecer o desaparecer, etc. En la naturaleza, todo esto estaría ocurriendo a una distancia muy pequeña, una distancia determinada por la fuerza de la gravedad. Esta distancia resulta ser muy, pero muy pequeña, una distancia  $10^{16}$  veces más pequeña que la distancia más pequeña que podemos ver con el microscopio más poderoso, que es el Large Hadron Collider. El problema con la masa del bosón de Higgs es la incógnita de por qué los fenómenos de la interacción débil están ocurriendo a una distancia tanto más grande que esta distancia básica de la gravedad. No sabemos. Dicho en otras palabras, ¿por qué es la gravedad mucho más débil que la fuerza débil?

Hay muchas ideas para entender estas propiedades extrañas del Modelo Estándar. Muchas de estas ideas postulan la existencia de nuevas partículas. Quizás estas sean pronto descubiertas en el Large Hadron Collider. ¡Estamos esperando sus resultados con ansiedad!

En esta exposición no hablamos de la fuerza fuerte. Esta es la fuerza que mantiene a los quarks dentro de los protones o neutrones. Esta fuerza también está basada en una simetría de medida. Para responder la objeción de Pauli, esta fuerza utiliza otro mecanismo que utiliza en forma inherente la mecánica cuántica.

Para terminar debemos mencionar que hay una evidencia importante que existe una nueva partícula. Esta evidencia viene de observaciones astronómicas que determinan indirectamente la cantidad de materia a través de la fuerza de la gravedad. Resulta que hay una mayor cantidad de materia que la que está compuesta por las partículas ordinarias que conocemos. Esta es la llamada “materia oscura”. Un buen candidato para la metria oscura sería una nueva partícula que pueda sentir la fuerza débil. A veces se llama “WIMP” (o “debilucho” en ingles). Es un buen candidato ya que su abundancia cosmológica según la teoría del Big Bang estaría en el rango adecuado para estar de acuerdo con las observaciones. También es una partícula predecida naturalmente por teorías que tratan de explicar los misterios del Modelo Estándar. También es posible que la materia oscura no tenga nada que ver con las interacciones débiles.

Esperamos que una vez que entendamos todo mejor encontraríamos que el campo de Higgs, que ahora es una componente “fea” del Modelo Estándar, se transformará en un apuesto príncipe, o al menos será parte del apuesto príncipe. *...y vivieron felices para siempre... o hasta que el universo decaiga...*

*FIN*

### **Agradecimientos**

Le doy gracias a N. Arkani Hamed, M. Echeverría, G. Farmelo, y C. Morgavio por comentarios. También le agradezco a Wikipedia por muchas de las figuras.

Una presentación en video similar a este artículo puede ser vista en:

<https://www.youtube.com/watch?v=TtMDk3ZCDCs>

## **5 Apéndice matemático: Una descripción cuantitativa de la analogía económica**

La versión en inglés de este artículo contiene un apéndice en donde la analogía económica se presenta en forma cuantitativa, con fórmulas, y se muestra que las ecuaciones de Maxwell y las de Procca (caso sin masa y caso masivo respectivamente) pueden obtenerse del modelo económico, luego de hacer algunas suposiciones razonables. El lector curioso, puede encontrar allí esta derivación. Perdón que no lo traduje, pero pensé que la cantidad de gente que lo leería y que no sabe inglés sería muy pequeña. La versión en ingles se puede encontrar en: <http://arxiv.org/abs/arXiv:1410.6753>