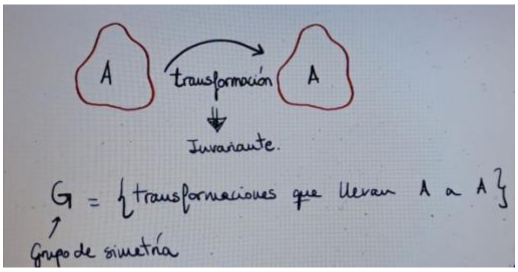
**Simetría:**

Una simetría geométrica en el espacio, o mejor, una transformación de simetría espacial de un objeto geométrico es, matemáticamente, una isometría que lleva al objeto a una situación indistinguible de sí mismo, de modo que el objeto posee una invariancia. Es decir, una operación que deja al objeto invariante cuando partes componentes iguales son intercambiadas según una regla dada. (Figura 1).




El conjunto de transformaciones de simetría como las rotaciones, traslaciones o reflexiones conforma en cada caso una estructura matemática llamada grupo. La definición de simetrías en términos de grupo permite imaginar las operaciones no solamente sobre figuras matemáticas sino también sobre objetos abstractos como son las expresiones matemáticas, en particular aquellas de las Leyes Físicas.

Por ello se habla de la presencia de simetrías de las Leyes de la Naturaleza, implicando que se puede hacer una operación a una Ley Física sin que se provoquen cambios en la forma de Ley. Es decir, sus efectos no conducen a alteraciones de la forma matemática que expresa un dado comportamiento de la Naturaleza.

Un ejemplo de simetría son los sistemas cuánticos de partículas idénticas. En Mecánica Clásica siempre se puede marcar y perseguir el movimiento de un conjunto de bolitas, aunque sean todas iguales. Sin embargo, en el dominio cuántico toda la información del sistema reside en su función de onda. Como no es posible conocer con total precisión la posición y el momento de cada partícula, no se puede saber cuál es cual si son idénticas. Las funciones de ondas reflejan este hecho, pero hay dos maneras de implementarlo: bajo el intercambio de posición de partículas idénticas cualquiera, o bien quedan invariantes (simetrías), o bien cambian de signo (antisimetrías). El primer caso, decimos que las partículas son bosones y el segundo son fermiones. El comportamiento estadístico de sistemas de muchas partículas idénticas es muy distinto en un caso o en el otro.

El principio de exclusión de Pauli, según dos fermiones idénticos no pueden hallarse en el mismo estado cuántico, es una consecuencia de la simetría de intercambio. Debido a esto, no puede haber dos electrones en el orbital atómico, lo que entre otras cosas determina las distintas configuraciones electrónicas, que explican los elementos químicos de la tabla periódica. Y también gracias al principio de exclusión de Pauli, ciertos tipos de estrellas (enanas blancas y estrellas de neutrones) pueden evitar el colapso gravitatorio.

Existen otras simetrías de las ecuaciones de la física que tienen que ver con invariancias bajo transformaciones continuas de ciertas variables. Son las relacionadas con las traslaciones temporales, las traslaciones espaciales y las rotaciones: las ecuaciones no pueden depender de cuando tomamos el origen del tiempo, o donde situamos en origen de coordenadas o en qué dirección apuntamos nuestro sistema de referencia. Da igual hacer un experimento hoy o pasado mañana, aquí, o con el laboratorio orientado hacia el punto cardinal que se elija, siempre que se haga en las mismas condiciones.

Para cada **simetría continua** hay aparejada una Ley de conservación, es decir, una cantidad conservada, que permanece constante en el tiempo. Este resultado es debido a Emmy Noether (1882-1935) (figura 2), una eminente y a la vez gran desconocida matemática alemana, tiene una influencia enorme en la física teórica. Las cantidades conservadas debidas a las simetrías antes mencionadas son, respectivamente, la energía, el momento lineal y el momento angular del sistema físico que describan las ecuaciones. ¡La Ley de la conservación de la energía es consecuencia de una simetría!

Las simetría continuas lo son bajo transformaciones de las coordenadas espacio-temporales (x,y,z,t). Pero también puede haber otras simetrías continuas bajo transformaciones de los campos, variables dinámicas que definen el problema en cuestión, que llamamos simetrías internas. Según el teorema de Noether, estas tienen asociadas cantidades conservadas, llamadas cargas.

Para tener una idea intuitiva de una simetría interna, se puede imaginar un sistema descripto por un campo: un rio que fluye entre las montañas, cuyo perfil orográfico viene dado por $A\,(x, y)$, una función que a cada coordenada $(x, y)$ del "plano" asocia una altura A. El campo $A\,(x, y)$ es el paisaje que observamos. La dinámica del rio viene especificada por la configuración del campo: en cada punto la corriente sigue la dirección en la que altura se hace menor.

Podría pensarse que no hay mucha simetría en este sistema, pero no se refiere a simetrías de las montañas sino a la de las ecuaciones que determinan por donde fluye el rio.

Si elevamos todo el paisaje a una altura $h$, arbitraria pero la misma en todos los puntos, el rio seguirá exactamente el mismo cauce. Por tanto, hay una simetría, las ecuaciones del rio son invariantes bajo una transformaciones global del campo ($\Delta \rightarrow \Delta + h$). Y hay una carga conservada, el caudal del rio, que permanece constante.

Si en cambio se hace una transformación local del campo, consistente en elevar el paisaje $h\,(x, y)$, distinta en cada punto, el rio cambiara de curso, las ecuaciones ya no serán invariantes. Para conseguir que la simetría también se dé bajo transformaciones locales, se tiene que introducir una fuerza compensadora (campo de interacción) que ante cualquier variación local de altura "empuje" al rio en la dirección adecuada para devolverlo a su cauce original. El campo de interacción necesario viene perfectamente determinado por cual es la simetría que se desea mantener. Llamamos simetrías de Gauge a esas simetrías internas locales y los campos de gauge a los campos de interacción que se requieren para preservarlas.

Esto permite explicar el origen de las interacciones fundamentales como las manifestaciones de las simetrías de gauge. Las Simetrías dictan las interacciones.

Las simetrías de gauge, que dan lugar a las interacciones, son el conjunto de transformaciones que dejan invariantes las ecuaciones de movimiento de los campos y están codificadas matemáticamente en un grupo que puede leerse: $SU(3)xSU(2)xU(1)$ y expresan los campos de interacción necesarios para mantener la simetría local. Estos grupos de simetrías tienen asignadas cargas:

Se llama carga de color respecto del primer grupo que puede tomar tres valores definidos de forma simbólica como R (Rojo), G (verde) y B (azul), de ahí viene el 3 de SU(3). Se llama isoespín débil a la carga respecto al segundo grupo SU(2).

Por ejemplo, una de las simetrías interna corresponde a la interacción electromagnética. Las ecuaciones del campo electromagnetico poseen una cierta simetría interna global, que conduce a la conservación de la carga eléctrica. Su nombre matemático es U(1). Para que esta simetría sea también local, ha de introducirse un campo de gauge que se acopla al campo del electrón, proporcionalmente a su carga. Este campo corresponde al electromagnético. Podría decirse que el campo electromagnético, y los del resto de las interacciones, están ahí para preservar las simetrías gauge del universo.