

3

Enfoque Sistémico

Naturaleza de los sistemas físicos

Todo el Universo está conectado de tal manera que cada hecho tiene algún tipo de influencia sobre todos los demás hechos. Consideremos solo el hecho de que continuamente estamos siendo bombardeados por partículas provenientes de diferentes lugares del espacio exterior. Baste como ejemplo la intensa radiación de rayos gamma de que fuimos objeto el 27 de agosto de 1998; la explosión fue tan poderosa que llevó a los detectores a su máximo y fuera de la escala por lo menos en siete sondas científicas en la Tierra y alrededor del Sistema Solar. La radiación vino de una estrella de neutrones altamente magnética a unos 20,000 años luz de distancia. La llamada "magnetoestrella" (magnetar) había estado siendo estudiada por varias semanas, pero antes de que los astrónomos anunciaran el descubrimiento el núcleo de la estrella aparentemente reventó, liberando un torrente de rayos gama. El objeto tiene un campo magnético de unas 800 billones de veces el de la Tierra y unas 100 veces más fuerte que cualquiera encontrado anteriormente en el Universo. El destello fue observado ionizando átomos de la atmósfera de la Tierra en el lado nocturno de la atmósfera. De esta forma resulta que la explicación del total de fenómenos que ocurren en el Universo, los cuales están conectados

entre sí, resulta una empresa por demás complicada. Lo anterior significa que la explicación de un hecho, de un evento, en particular que suceda en nuestro entorno requiere por necesidad la incorporación del resto del Universo, como causas de su acontecimiento; requerimos así un número infinito de características que debemos incorporar para su explicación; de todas esas características habrá algunas que resultan más importantes que otras, dependiendo del tipo de explicación que queramos dar, de tal suerte que en dichas explicaciones, podríamos omitir esas características que prácticamente no afectan nuestra explicación. Por continuar con nuestro ejemplo, a pesar de que la radiación de rayos gama fue sumamente intensa, ésta prácticamente no afectó fenómenos, como podría ser la caída de un objeto o el desarrollo de un juego de basquetbol. Un jugador que falló un intento de enceste, ese 27 de agosto, no tendría como pretexto el fenómeno comentado. Además, el fenómeno descrito fue en sí excepcional; es extremadamente raro para que un evento fuera del Sistema Solar tenga un efecto de esa magnitud en la Tierra. Las características que puedan usarse en las explicaciones de los fenómenos no tendrían sentido si no las relacionamos con aspectos que nosotros podamos sentir, esto es, aspectos que podamos observar; este conjunto de características les llamaremos: observables; de esta forma un observable, es aquello que podemos sentir y así estimar el grado de afectación que tiene sobre el fenómeno, esto es, su magnitud. La observación podría estar sustentada por teorías científicas y corresponder a un observable en el sentido amplio, correspondiente por lo tanto a la base empírica.

Estructura del sistema

Bajo este esquema, tenemos que la explicación de un fenómeno requiere la participación de un gran número de observables, en principio, para una explicación exacta y precisa se requiere la competencia de un número infinito de observables, en virtud de la incorporación de todo el Universo. Estos observables están interrelacionados entre sí, por lo que podemos expresar en forma funcional, la explicación del fenómeno, esto es, dicha

explicación requiere conocer la función: $f(A,B,C,D,E,F,\dots)$, donde A, B , etc. se refieren a los observables considerados, que en este caso son infinitos en número. De esta manera, la explicación satisfactoria, en el sentido de exacta, es prácticamente imposible. Como hemos discutido anteriormente, algunos de estos observables afectan en forma despreciable al fenómeno en cuestión, por lo que pueden ser despreciados sin afectar la explicación del fenómeno de interés. Lo que estamos haciendo es en sí, una aproximación. El número de observables, en este sentido, nos especifica el tamaño del sistema considerado. El sistema completo requiere el considerar la totalidad de observables disponibles (un número infinito), lo que significa que estamos considerando el total del Universo. La reducción considerable en el número de observables nos conduce a tener un sistema reducido, tan reducido como sea posible, para poder tener una explicación satisfactoria del fenómeno. De esta forma reducimos el tamaño del sistema a grados adecuados en los cuales el análisis del mismo se simplifica.

La reducción del sistema físico a tamaños manejables, depende del tipo de explicación que se quiera dar; la explicación requerida debe de ser satisfactoria, llevándose a cabo aproximaciones adecuadas que no afecten considerablemente la explicación exacta del fenómeno; aún así, es posible hacer reducciones más allá de los límites permisibles para la explicación satisfactoria, por supuesto en este caso, el número de observables se llevó a su mínima expresión.

El tamaño del sistema queda indicado por el número de observables a considerar. El sistema queda especificado por la función: $f(A,B,C,D)$. La función, encierra la información necesaria en la explicación del fenómeno y extiende el dominio de la interpretación, pues por su carácter regulador, nos dice la forma en que se comporta el sistema, en lo que se refiere al fenómeno descrito, en cualquier instante y en cualquier lugar del Universo; de esta forma queda establecida una ley, que llamaremos ley física. La ley física, así, queda representada matemáticamente como una fórmula que relaciona a los observables que definen el sistema, dichos observables, por

el hecho de poder ser medidos, constituyen las cantidades físicas, englobadas en las leyes que gobiernan el comportamiento del Universo.

Como hemos indicado, los observables son sentidos por nuestros sentidos, de tal manera que podemos apreciar los cambios que sufren. Dado un sistema, esos cambios repercuten en el resto de los observables de acuerdo a la relación matemática que guardan entre sí. Determinar su relación significa encontrar la ley que gobierna el comportamiento de los observables y por lo tanto del fenómeno estudiado.

Del mismo modo la ley permite relacionar observables y por lo tanto se convierte en uno de los mecanismos de extensión de la base empírica, en el sentido que le da explicación a un posible nuevo observable que cumple con las exigencias de efectividad, repetibilidad e intersubjetividad, que todo dato de la base empírica debe de tener.

Determinar la ley física, requiere poder decir como se relacionan los observables entre sí, relación que, en principio, podemos obtener al encontrar cómo varia la magnitud de un observable, cuando varia la magnitud de los demás observables; la variación de la magnitud es percibida por el observador a través de sus sentidos. Obtener una magnitud, significa efectuar una comparación del observable con respecto a otro observable de la misma especie, o sea homogéneos entre sí; este proceso de comparación lo denominamos medición.

Los valores que asumen el conjunto de observables representa un estado físico del sistema, estado que se mantiene mientras no cambien los valores de dichos observables, en el entendido que la variación de sus valores será de acuerdo a la función matemática que representa la ley física. La variación de un solo de los observables implica cambios en el resto de los observables que especifican el sistema, combinado así el estado físico del sistema.

Dado un estado físico, este no puede cambiar a menos que el sistema interactúe con sus alrededores, requisito indispensable, pues la variación en el valor de los observables que definen el sistema requieren de una interacción.

El estado físico del sistema queda especificado por los valores particulares que asumen los observables que definen el sistema

$$D=f(A,B,C)$$

Una variación en el valor del observable B , implica la variación del valor del observable D y por lo tanto un cambio en el estado físico del sistema. Denotando el cambio en B como B' y el cambio en D como D' , tenemos el nuevo estado físico especificado por la función

$$D'=f(A,B',C)$$

El cambio en el valor de B se logra solamente a través de una interacción del sistema con sus alrededores. Dicha interacción sucede en un tiempo finito y la representamos como

$$B' = \frac{dB}{dt}$$

Que representa la variación del observable B en un intervalo infinitesimal de tiempo, esto es, en un instante t , debido a la interacción del sistema con sus alrededores. La variación en B (B'), que especifica un cambio de estado físico, representa a su vez un nuevo observable de la zona teórica que se convierte en observable de la zona empírica extendida, con apoyo de la misma ley que representa a la teoría que le da sentido al nuevo observable. El nuevo estado físico lo podemos representar como

$$D' = f\left(A, \frac{dB}{dt}, C\right)$$

Si no existe ninguna interacción del sistema con sus alrededores, entonces no puede suceder un cambio en el estado físico del sistema, lo que significa que los valores para los observables que definen el sistema físico no deben de cambiar al transcurrir el tiempo, de esta manera se cumple que para todo tiempo

$$A = \text{const.}; B = \text{const.}; C = \text{const.}; D = \text{const.}$$

Si al transcurrir el tiempo alguno de los observables cambia de valor, el cambio debe de ser tal que no repercuta en un cambio de estado del sistema, esto es en el caso en que el sistema no interactúe con los alrededores. Lo anterior significa que el cambio en el valor del observable, que necesariamente se debe a una interacción, debe de compensarse con un cambio en observable homogéneo que representa a un objeto dentro del sistema que interactuó con el objeto representado por el observable que sufrió el cambio.

De esta manera la función de estado debe incluir dicho observable homogéneo y tener una estructura matemática tal que no varíe al variar ambos observables, como producto de la interacción interna. Si de nuevo, el observable que varía es el observable B entonces la función de estado es de la forma:

$$D = f(A, B_1, B_2, C)$$

En donde al cambiar el valor del observable B_1 , entonces debe de variar el valor del observable B_2 , de tal forma que se cumpla la conservación del total de los observables que definen el sistema. En particular el observable B debe permanecer constante, lo que significa que todos los observables homogéneos, en este caso, B_1 y B_2 deben mantener su valor total sin cambio, esto es,

$$B_1 + B_2 = \text{const.}$$

Por lo que un cambio en B_1 debe de ser tal que B_2 cambie en forma compensatoria y mantenga la suma constante, lo que se representa como

$$\frac{dB_1}{dt} = -\frac{dB_2}{dt}$$

La función de estado queda especificada como

$$D = f\left(A, \frac{dB_1}{dt}, -\frac{dB_2}{dt}, C\right)$$

E términos del estado físico del sistema la función es establecida como

$$B = f(A, C, D)$$

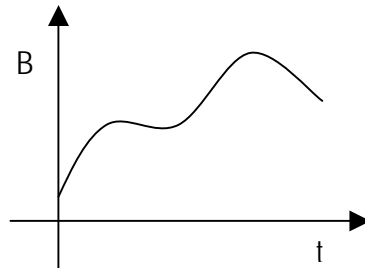
Haciendo explícita su dependencia en el tiempo, en el sentido que puede evolucionar y las observaciones realizarse al transcurrir el tiempo, la función de estado implica el tiempo como uno de los observables para el sistema físico

$$B = f(A, D, t)$$

Los cambios de estado físico se establecen mediante la relación

$$\frac{dB}{dt} = df(A, D, t) / dt$$

Las anteriores funciones de estado pueden ser representadas gráficamente, como una gráfica de B vs t , gráfica que da información del estado físico del sistema y su comportamiento en términos del tiempo.



Análisis de un caso

Si deseamos explicar el comportamiento de un cuerpo, cuando este es jalado o empujado por algún agente, podemos centrar nuestra atención en un observable que represente ese comportamiento, por ejemplo, en este caso podría ser, la distancia recorrida por el objeto mientras es jalado o empujado. Los observables involucrados que afecten significativamente esa distancia, definirán el sistema físico considerado; efectuando observaciones en nuestro experimento, podemos notar que al empujar el objeto la distancia recorrida, dependerá de la magnitud de la fuerza aplicada y del tiempo considerado, igualmente depende de la superficie sobre la cual es jalado o empujado el cuerpo, podrían considerarse otros observables, pero afectarían mínimamente el fenómeno de interés. De esta forma nuestro sistema queda definido de la siguiente forma:

$$f(d, F_a, t, F_f)$$

Donde d es la distancia recorrida, F_a la fuerza aplicada, t el tiempo de recorrido y F_f representa una fuerza de fricción que representa el tipo de superficie sobre la que es jalado el cuerpo. El sistema considerado puede ser reducido aún, si consideramos que las superficies de contacto no presentan mucha resistencia al movimiento, lo cual físicamente puede ser posible, por ejemplo, si consideramos como nuestro objeto de estudio un trozo de hielo, y si además consideramos que este trozo de hielo resbala sobre una superficie lisa, nuestra consideración de resistencia al

movimiento insignificante, mejora. De esta forma nuestro sistema se vería reducido en un observable y quedaría definido de la siguiente forma $f(d, F_a, t)$. Por otro lado, si no consideramos fricción despreciable, podemos seguir el análisis del sistema, considerando como observable una fuerza neta aplicada sobre el objeto, la cual tendría una magnitud menor que la fuerza aplicada, pues sería equivalente a la fuerza aplicada disminuida por la fuerza de fricción. De esta manera tendríamos un sistema físico definido por: $f(d, F, t)$, donde F es la fuerza neta. En ambos casos hemos podido reducir el tamaño del sistema físico, pero en el segundo caso resulta más general que el anterior pues es válido para un mayor número de situaciones.

El objeto de análisis del sistema ha sido la distancia de recorrido, por lo que, en principio nos interesa saber su comportamiento, así el sistema se particulariza de la siguiente forma:

$$d=f(F, t)$$

La que nos da información del comportamiento de la distancia recorrida cuando se le aplica una fuerza, durante un cierto intervalo de tiempo.

Para obtener la relación, requerimos efectuar mediciones. Empecemos realizando mediciones cualitativas, para lo cual utilizamos nuestro sentidos como instrumento de medición.

En nuestro experimento, debemos ser capaces de controlar los observables, cantidades físicas, para lo cual procedemos mediante la realización de un experimento controlado, esto es, mediremos la distancia recorrida, cuando variamos, una a la vez manteniendo constante la otra, el resto de las cantidades físicas que definen nuestro sistema.

Considerando un mismo tiempo de observación y utilizando diferentes magnitudes de fuerza aplicada sobre un mismo objeto, podemos observar que conforme la fuerza aplicada crece en magnitud la distancia que recorre

el cuerpo aumenta. Esta medición cualitativa nos permite escribir la relación entre distancia recorrida y fuerza aplicada, como

$$d \propto F^n$$

que nos indica que la distancia recorrida por el objeto es proporcional a la fuerza aplicada elevada a cierta potencia positiva, cuyo valor, por lo pronto, no podemos determinar. En este momento hemos determinado una ley física, que se cumple bajo las condiciones expuestas al experimento, por supuesto es muy limitada. Si ahora consideramos una misma fuerza aplicada y diferentes tiempos de observación, encontramos que conforme el tiempo de observación es grande la distancia recorrida será grande, mientras que sí el tiempo de observación es pequeño la distancia recorrida también lo será; esta situación la representamos mediante la relación:

$$d \propto t^m$$

nuevamente el valor de la potencia m no puede ser obtenida, sólo sabemos que debe de ser positiva. Tenemos especificada otra ley para el mismo fenómeno, que al igual que la anterior es muy limitada, y sólo es válida para el caso que hemos considerado. La situación más general se presenta cuando permitimos que ambos casos sucedan a la vez; obtendríamos que la distancia recorrida por el objeto es proporcional tanto a la fuerza aplicada como al tiempo de observación, esto queda expresado por la relación:

$$d \propto F^n t^m$$

De esta relación podemos obtener una ecuación, que expresamos de la siguiente forma:

$$d = cF^n t^m$$

donde c es una constante de proporcionalidad, que tampoco podemos determinar en estos momentos. Sin embargo, tenemos expresada una ley que nos da información de la forma en que se comporta el objeto al aplicarle una fuerza, misma que tiene un carácter general y es válida en cualquier momento y en cualquier lugar del espacio.

El sistema físico considerado, puede ser analizado utilizando a su vez otras leyes físicas, por ejemplo, podríamos haber considerado la ley física, conocida como la ley del movimiento de Newton, la cual es expresada mediante la ecuación: $F = ma$, la definición de nuestro sistema físico estaría influenciado por esta ley; por un lado, además de la distancia recorrida, tendríamos el tiempo de observación como observable, y por otro lado tendríamos la fuerza aplicada, que usando la ley de Newton, nos diría que dicha fuerza al aplicarse a un mismo cuerpo provoca un cambio en la aceleración del cuerpo, cambio que es directamente proporcional a la fuerza aplicada, nótese que hemos dicho directamente proporcional, pues el exponente de la aceleración en la expresión para la ley de Newton tiene un valor unitario. De esta manera tenemos, que al usar la llamada segunda ley de Newton, nuestro observable será la aceleración del cuerpo que crece en la misma magnitud que la fuerza aplicada, de esta manera tenemos que nuestro sistema físico queda definido por la relación

$$f(d,a,t)$$

y efectuando el mismo experimento controlado encontraríamos la siguiente ley:

$$d \propto a^n t^m$$

donde las potencias n y m tendrán los mismos valores, aún no determinados, que en el caso anterior. Esta ley puede ser expresada por la ecuación:

$$d = ka^n t^m$$

donde k es una constante de proporcionalidad; aquí k no tiene necesariamente el mismo valor que la c del caso anterior. Ambas ecuaciones nos especifican la forma en que se comporta el sistema físico analizado. Las constantes de proporcionalidad presentan dos aspectos: 1) encierran parte de la información que hubiéramos omitido en el análisis, como podría ser, el no haber considerado una cantidad física importante para la explicación del sistema; 2) la forma en que son medidas las cantidades físicas involucradas, esto es, dos diferentes procesos para medirlas conducen a obtener diferentes constantes de proporcionalidad y por lo tanto dos ecuaciones que numéricamente darán resultados numéricos diferentes para el mismo sistema. De esta forma las constantes de proporcionalidad, podrían ser adimensionales (un número puro), o dimensionales (tendrían asociadas a su valor unidades de medida).

El conocimiento de toda la gama de leyes físicas nos permite explicar la totalidad de fenómenos que ocurren en el Universo y por lo tanto el comportamiento del Universo mismo. Todas las leyes están conectadas entre sí, y muchas más faltan por determinarse, algunas posiblemente sean limitadas y se vean mejoradas en un futuro; el ejemplo analizado es limitado en su explicación, aunque la aproximación hecha es buena, existen más observables que pueden ser considerados y por lo tanto mejoran y enriquecen la explicación que se pueda dar del sistema, el conocimiento y manejo adecuado de las leyes de la naturaleza es equivalente a hacer física.