

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XI JORNADAS

VOLUMEN 7 (2001), Nº 7

Ricardo Caracciolo

Diego Letzen

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



# El principio de causalidad: la única ley permanente

Oswaldo M. Moreschi\*

## 1. Introducción

Un objetivo fundamental de las ciencias es el incremento de nuestro conocimiento sobre la especialidad bajo estudio. Este conocimiento, usualmente se sintetiza en la forma de "leyes naturales". Cuando decimos que las ciencias nos proveen de conocimiento, no nos referimos a la mera descripción de fenómenos, sino a la explicación de los procesos involucrados. En particular es común afirmaciones de la forma:

$$C \rightarrow E;$$

que puede leerse como  $C$  implica  $E$ ; o si se observa  $C$  entonces ocurre  $E$ . Estas son afirmaciones típicas que contienen una noción de causalidad; donde se diría que  $C$  aparece como causa del efecto  $E$ . Es así que en todas las ciencias factuales encontramos el llamado *principio de causalidad*. La descripción del principio de causalidad puede variar de ciencia en ciencia, debido a la naturaleza de la misma; pero comparten la relación con un orden temporal de los sucesos, donde las causas anteceden a los efectos.

Vemos entonces que del conjunto de leyes naturales, el principio de causalidad aparece como singular. La cuestión que nos interesa concierne la importancia del principio de causalidad en nuestro entendimiento de la naturaleza.

Una postura posible es que en realidad el principio de causalidad es más bien superfluo si se dispone de las leyes dinámicas específicas de la ciencia [1][2][3][4].

La tesis que planteamos aquí afirma que existe una ley Universal y fundamental en toda teoría dinámica de la naturaleza que es el principio de causalidad.

## 2. Breve revisión del principio de causalidad

Debido a que el tema fundamental bajo estudio es el principio de causalidad y debido a la variedad de conceptos asociados a la causalidad [5]; es oportuno una breve revisión de la noción que tenemos en mente.

Desde un punto de vista general, entendemos por causalidad a la relación entre eventos, ordenados temporalmente, donde los sucesos del pasado explican los eventos del futuro. Cuando decimos eventos incluimos también conjunto de ellos; que pueden implicar por ejemplo el estado de campos físicos.

Muchas causas pueden contribuir a observar un determinado efecto.

Si entendemos el determinismo como una relación constante y unívoca entre sucesos; entonces no consideramos a la causalidad como equivalente a determinismo. En particular admitimos la noción de causalidad para leyes cuya predicción puede tener una naturaleza probabilística. Este punto quedará más claro cuando toquemos el tema de la física cuántica.

Podemos aquí, sin embargo, adelantar una reflexión de carácter general. Las ecuaciones dinámicas de la física son deterministas; en el sentido de que conocidos los apropiados datos iniciales, las ecuaciones dinámicas nos dan el método para calcular su evolución temporal. Lo que sucede es que conocidos los campos físicos a un determinado tiempo,

\* FaMAF, Universidad Nacional de Córdoba. Miembro del CONICET.

puede ser que la teoría sólo nos provea de una descripción probabilística de las observaciones o experimentos. Esto es lo que ocurre en la mecánica cuántica por ejemplo.

Sería incompleto que nos refiramos al tema del determinismo sin mencionar el tema del libre albedrío. Soy consciente que toco un tema que genera grandes discusiones, pero es necesario incluirlo.

En lo que sigue nos concentraremos en lo que podemos decir sobre el principio de causalidad basados en nuestro conocimiento del desarrollo de la física. Sin embargo nuestras afirmaciones sobre el principio de causalidad las entendemos de validez universal; incluyendo también a los procesos inherentes a la naturaleza humana.

Existen dos nociones del principio de causalidad; una que denominaremos local en término de eventos en el espaciotiempo correspondiente; que básicamente afirma que: "si  $p$  es un evento, entonces todo otro evento  $q$  en el pasado de  $p$  puede afectar a lo que sucede en  $p$ ; además, el evento  $p$  depende sólo de los eventos en su pasado." Notamos que el principio local también implica la noción coloquial del principio de causalidad que afirma que *nada proviene de la nada*; o equivalentemente *todo tiene explicación en sucesos del pasado*. Observemos que la definición depende fuertemente del concepto de pasado.

La otra concepción del principio de causalidad involucra una noción global de causalidad; en la que se asume propiedades globales del espaciotiempo de tal forma que: "se excluye la posibilidad de que eventos en el pasado de  $p$  también puedan estar en el futuro de  $p$ ." Esta última concepción se la puede considerar una noción fuerte del principio de causalidad pues impone restricciones sobre la estructura del espaciotiempo.

De aquí en más cuando nos refiramos al principio de causalidad significaremos las implicaciones de las dos nociones enunciadas.

### 3. El principio de causalidad en los distintos marcos teóricos de la física

#### 3.1 Física clásica

Las ecuaciones dinámicas de Newton se formulan en término de los llamados sistemas inerciales. Una propiedad del sistema de ecuaciones es que es invariante ante el grupo de Galileo. La propiedad de invariancia de las leyes de movimiento ante estas transformaciones es conocida como el *principio de la relatividad Galileana*.

Estas transformaciones entre el sistema inercial caracterizado por las coordenadas  $(t, x^i)$  y el caracterizado por las coordenadas  $(t', x'^i)$ , donde los índices  $i$  y  $j$  van de 1 a 3, dejan invariante la medida de intervalos temporales y la medida de distancia Euclidiana en el espacio tridimensional. Esto es, la estructura de las ecuaciones dinámicas nos dan la estructura del espaciotiempo; el cual incluye una noción de tiempo absoluto, separado de la noción de un espacio Euclideo tridimensional.

Recordemos que en la definición del principio de causalidad interviene el concepto de pasado de un evento  $p$ ; en la física Newtoniana, los eventos  $q$  en el pasado de un evento  $p$  con coordenadas  $(t_p, x_p^i)$ , es todo evento  $q$  con coordenadas  $(t_q, x_q^i)$  con  $t_q \leq t_p$ .

Tenemos así al primer ejemplo de síntesis en término de leyes naturales generales para la dinámica; que incluye una particular versión del principio de causalidad.

Sin embargo, la imagen Newtoniana de la física no termina allí, pues también influyó fuertemente en lo que entendemos hoy por determinismo. Es una propiedad de las ecuaciones dinámicas de la mecánica clásica que dando las posiciones y velocidades de las partí-

culas, que forman el sistema, a un dado tiempo inicial, su ulterior movimiento queda absolutamente determinado.

Esta propiedad se la ha asociado históricamente a la noción de causalidad; pero veremos más adelante que se debe ser cuidadoso con el concepto de determinismo cuando se entra en el dominio de la mecánica cuántica; lo que trataremos más adelante.

### 3.2 Física de la relatividad especial

En la relatividad especial se asume la existencia de una velocidad máxima para las interacciones.

Podemos probar que el admitir una velocidad máxima  $c$  para las interacciones en un sistema inercial, implica que las transformaciones entre los sistemas inerciales son las llamadas transformaciones de Lorentz; también se prueba que la velocidad máxima es la misma para todo sistema inercial [6]. Estamos afirmando en particular que en la formulación original de Einstein (1905) de la relatividad especial [7] es innecesario el segundo principio que requiere que la velocidad máxima de las interacciones sea el mismo en distintos sistemas inerciales. De esta manera aparece en la física una nueva constante Universal, la velocidad  $c$ .

Las transformaciones de Lorentz dejan invariante la métrica de Minkowski del espacio-tiempo. Respecto de un sistema inercial Cartesiano, podemos representar la métrica de Minkowski por una matriz diagonal 4 por 4; con diagonal  $(1, -1/c^2, -1/c^2, -1/c^2)$ ; siendo la primera la componente temporal. Vemos entonces que el espaciotiempo de la relatividad especial es una variedad cuadridimensional. En particular el tiempo está vinculado por las transformaciones de Lorentz a las direcciones espaciales; por lo que en este caso no define una variedad temporal absoluta como era el caso del espaciotiempo Galileano.

Por otro lado se comprueba experimentalmente que las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo son invariantes ante las transformaciones de Lorentz; identificándose en este proceso a la velocidad  $c$  con la velocidad de la luz en el vacío.

En este marco teórico, el principio de causalidad en su versión local, tiene una descripción un poco más complicada que el de la mecánica clásica. El concepto de pasado de un evento  $p$  con coordenadas  $(t_p, x_p^i)$ , en la física de la relatividad especial, es el conjunto de los eventos  $q$  con coordenadas  $(t_q, x_q^i)$  con  $\sqrt{(x_p^i - x_q^i)^2} + t_q \leq t_p$ . O sea la distancia tridimensional entre los eventos tiene que ser menor o igual que la distancia temporal; esto geoméricamente se expresa diciendo que el evento  $q$  tiene que estar en el cono causal pasado del evento  $p$ .

Esta situación hace que la descripción de las interacciones por medio de campos tome relevancia propia; a diferencia de lo que ocurría en el caso Newtoniano, donde todo dependía del estado instantáneo de las partículas.

La fuerza de Lorentz para partículas de prueba sujetas a interacciones electromagnéticas es un ejemplo de ley dinámica que satisface el principio de causalidad relativista.

### 3.3 Física cuántica (no relativista)

Otro desafío importante en nuestra concepción de la naturaleza vino con el surgimiento de la mecánica cuántica en la década del veinte. Para ser más concretos pensemos en la versión de la mecánica cuántica no relativista basada en la ecuación de Schrödinger [8].

Asociada a una *partícula* se encuentra la noción de *función de onda*. La interpretación estándar de la función de onda, es que nos provee de la probabilidad de encontrar la partícula en un dado estado. Esto implica que ya no se cuenta con una predicción absolutamente determinista de las observaciones como se tenía en la mecánica clásica Newtoniana o en la mecánica relativista. Pero sin embargo la ecuación de Schrödinger es determinista; en el sentido que dada una función de onda a un determinado tiempo, la ecuación permite calcular la misma en tiempos posteriores. O sea que mientras la ecuación dinámica es determinista, la predicción de las observaciones no lo es.

En la mecánica cuántica uno se enfrenta además con el llamado principio de incerteza de Heisenberg. La desigualdad de Heisenberg, que da forma matemática al principio de incerteza, establece una cota inferior al producto de las incertezas de las posiciones y los momentos medidos para una partícula. La cota está caracterizada por una nueva constante Universal, la constante de Planck.

Dado un sistema cuántico que primero es medido por el observador Alberto y luego por el observador Pablo, es natural afirmar que la causa que determina el estado al que tiene acceso Pablo en su medición depende de la decisión de Alberto de medir (y de su resultado) o de no medir. Si fuésemos incapaces de descubrir alguna ley dinámica que determine las decisiones de Alberto; estaríamos ante la situación de que no tendríamos ninguna ley dinámica que explicase las observaciones de Pablo; aunque seguiríamos haciendo uso del principio de causalidad para describir la situación. En otras palabras, incluso cuando no disponemos de todas las leyes dinámicas apropiadas, la validez del principio de causalidad se manifiesta en los procesos. Si el sistema fuese clásico, en principio las mediciones de Alberto podrían no afectar al sistema; por lo que las observaciones accesibles a Pablo no dependerían de lo medido por Alberto.

### **3.4 Física cuántica de campos relativista**

La formulación de una mecánica cuántica relativista nos conduce a la teoría cuántica de campos relativista.

En esta teoría, el espaciotiempo subyacente es el Minkowskiano al que hicimos referencia anteriormente. Todas las ecuaciones son por lo tanto invariantes ante las transformaciones de Lorentz. Por lo que podemos adelantar que la noción de pasado es la descrita en la subsección referente a la relatividad especial.

En este marco teórico, el principio de causalidad local se manifiesta directamente en las propiedades de conmutación (anticomutación) de los campos cuánticos evaluados en dos puntos  $x_p$  y  $x_q$  del espaciotiempo. La forma de los conmutadores (anticommutadores) de campos cuánticos garantiza la validez del principio de causalidad local en este marco teórico.

Es interesante remarcar que tanto en el proceso de construcción de una teoría, como en su explicación posterior, se hace uso de la forma de los conmutadores como guía para seleccionar las teorías que pueden tener sentido.

### **3.5 Física de la relatividad general**

Tanto en el espaciotiempo Galileano como en el espaciotiempo de Minkowski, la versión fuerte del principio de causalidad se cumple debido a las características globales de dichos espaciotiempos. Es recién en el contexto de la relatividad general, donde los espaciotiem-

pos deben ser calculados de la distribución de masa, que el principio de causalidad fuerte adquiere un contenido no trivial.

La descripción del principio de causalidad fuerte de la sección anterior no es lo suficientemente precisa cuando tratamos una teoría relativista de la gravitación; pues permite la aparición de una serie de casos patológicos no deseados. Por este motivo, en esta clase de teorías, entenderemos por el principio de causalidad fuerte al que requiere que el espacio-tiempo  $(M, g_{ab})$ , determinado por la variedad diferenciable  $M$  y la métrica Lorentziana  $g_{ab}$ , sea globalmente hiperbólico. La definición completa de un espacio globalmente hiperbólico nos requeriría demasiada extensión; por lo que señalamos la referencia [10]. Nos limitamos aquí a mencionar que en un espacio globalmente hiperbólico los campos físicos, que satisfacen ecuaciones hiperbólicas, son determinados, en cualquier punto del espaciotiempo, por datos en una hipersuperficie espacial, llamada de Cauchy.

Queda claro que el principio de causalidad fuerte es una condición no trivial sobre la estructura del espaciotiempo  $(M, g_{ab})$ ; siendo esta condición *a priori* de la discusión de cuáles son las ecuaciones de campo específicas. En particular, las ecuaciones de campo deben ser hiperbólicas, para que valga el principio de causalidad en su versión local. O sea que el principio de causalidad impone restricciones sobre el espaciotiempo y sobre las ecuaciones de todos los campos que deseamos describir.

### 3.6 Física de la gravedad cuántica

Para completar esta breve descripción de los distintos marcos teóricos de la física, nos deberíamos referir al marco teórico de la teoría de la gravedad cuántica. Lamentablemente esta teoría todavía no está construida.

Sin embargo los esfuerzos que se hacen en esta dirección estarían indicando que posiblemente debemos realizar una reformulación completa de nuestra concepción del espaciotiempo; en particular es posible que tengamos que recurrir a espaciotiempos discretos para poder construir una teoría consistente de la gravedad cuántica.

Es interesante señalar que existen trabajos en la literatura sobre espaciotiempos discretos [11] que casualmente hacen uso del principio de causalidad para la construcción de dichos espacios. En la referencia [11] se describe un conjunto discreto ordenado parcialmente por el tipo de conexión causal de los mismos.

Vemos entonces que si bien no podemos formular afirmaciones definitivas sobre el principio de causalidad en el contexto de la gravedad cuántica, detectamos que es una herramienta útil en las investigaciones que tienden a construir dicha teoría.

## 4. Causalidad en el contexto cosmológico

Una característica sobresaliente del espaciotiempo cosmológico es la presencia de la singularidad cósmica inicial. Hemos discutido en otra oportunidad algunas de las consecuencias de dicha situación [12]; en particular remarquemos aquí que es posible explicar de primeros principios, que involucren al principio de causalidad, al desarrollo de sistemas cada vez más complejos a medida que transcurre el tiempo cósmico. Más específicamente, en la referencia [12] hemos explicado las propiedades de homogeneidad e isotropía del Universo temprano desde el principio de causalidad y la existencia de la singularidad cósmica inicial.

En relación con este punto en la referencia [13] hemos probado, basados en el principio de causalidad, que la entropía por unidad de volumen tiende a cero cuando uno se acerca a la singularidad inicial.

## 5. La descripción de la naturaleza física por medio de un lenguaje formal

En otra oportunidad hemos postulado la posibilidad de una descripción completa de todo sistema finito por medio de sentencias de algún lenguaje formal [12].

Podemos pensar en hacer uso de este lenguaje formal para la descripción de eventos locales; tanto sean de un espaciotiempo continuo como discreto, en término de ecuaciones de nuestro lenguaje formal. Por ecuaciones entendemos sentencias de la forma  $p = x$ ; donde la identidad de nuestro lenguaje formal es usada para marcar una relación uno a uno entre el evento  $p$  y la "posición"  $x$  del espaciotiempo.

Vemos entonces que el hecho de que haya ocurrido  $p$  en  $x$  es crucial para describir si puede o no ocurrir  $q$  en la posición  $y$ ; donde la posición  $y$  está en el futuro causal de  $x$ . Desde este punto de vista, a través de la descripción física por medio de un lenguaje formal, uno diría que la ecuación  $q = y$  es sólo posible si en la formulación del lenguaje formal, la ecuación  $p = x$  antecede a  $q = y$ . Más precisamente diríamos que el teorema  $q = y$  se puede probar si en las hipótesis del mismo tenemos al conjunto de ecuaciones  $p = x$ , para todo  $x$  en el pasado de  $y$ .

El admitir que todo sistema finito es perfectamente describable en término de sentencias finitas de un lenguaje formal, nos conduce a una analogía entre las leyes causales con las leyes de la lógica del lenguaje formal.

Esto nos indica que si describimos un sistema dinámico en término de un lenguaje formal, entonces el orden causal será un ingrediente irrenunciable de dicha descripción. En otras palabras el principio de causalidad es un elemento fundamental de toda teoría dinámica descrita por medio de un lenguaje formal; como ocurre en las teorías físicas.

## 6. Comentarios finales

Un argumento que tenemos a favor de nuestra afirmación de que el principio de causalidad es la única ley permanente es que las demás leyes naturales son cambiantes con el tiempo; como se ha visto en nuestro repaso del desarrollo histórico de distintos marcos teóricos de la física. Debemos distinguir por un lado el hecho de que teorías que se comprobaron como válidas en un determinado rango de aplicabilidad; luego resultaron perfectibles por medio de alguna otra teoría más general que la incluía en algún límite.

En cada uno de los marcos teóricos descriptos, con su inherente noción de espaciotiempo, se observa la validez del principio de causalidad.

Otro argumento, tal vez mucho más fuerte, sobre su importancia en el conocimiento científico, es que el principio de causalidad restringe las leyes naturales y a la estructura del espaciotiempo; por lo tanto es refutable por observación o experimentación. Lo concreto es que no se conoce de ninguna observación o experimento que lo refute. Si rechazamos la realidad del principio de causalidad estaríamos rechazando parte del conocimiento científico; tal como se lo entiende usualmente.

Esta última afirmación está en un todo de acuerdo con el criterio de satisfactoriedad potencial relativa de una teoría, que aparece en la literatura [14]; que "considera preferible la teoría que nos dice más; o sea, la teoría que contiene mayor cantidad de información o contenido empírico; que es lógicamente más fuerte; que tiene mayor poder explicativo y predicativo; y que, por ende, puede ser testada más severamente comparando los hechos predichos con las observaciones."

Se observa que el principio de causalidad es una herramienta útil en el estudio del marco teórico adecuado para describir la gravedad cuántica; dado que como ocurre en la referencia [11] provee de una guía para la construcción de espaciotiempos discretos, que tengan chances de involucrar la estructura Lorentziana cuando se los observa en escalas macroscópicas.

El hecho de que hayamos tenido éxito en el pasado para explicar la homogeneidad e isotropía del Universo temprano basándonos en el principio de causalidad [12] es un fuerte soporte a la tesis que establece a este principio como una característica real del Universo

El planteamiento de la sección anterior muestra que el principio de causalidad no sólo es consistente con las leyes naturales sino que es una necesidad lógica de la descripción de la dinámica en término de un lenguaje formal.

Por último quisiera mencionar el peligro de renunciar al principio de causalidad en el contexto de las ciencias sociales.\*

### Reconocimientos

Agradecemos el apoyo de CONICET, FONCYT BID 802/OC-AR PICT: 00223 y SeCyT-UNC.

### Bibliografía

- [1] Flichman, E.H., "The causalist program. Rational or irrational persistence?", *Crítica, Revista Hispanoamericana de Filosofía*, Vol. XXI, Nro. 62, 29, (1989).
- [2] Flichman, E.H., "Causas. Leyes naturales y explicaciones científicas", *Revista Latinoamericana de Filosofía*, Vol. XXI, Nro. 1, (1995).
- [3] Flichman, E.H., "Elucidación y análisis: intuición y antropomorfismo en las ciencias naturales", (1996).
- [4] Flichman, E.H., comunicación privada.
- [5] Bunge, M., *Causality and Modern Science*, Dover Pub. Inc., third ed., (1973).
- [6] Moreschi, O.M., *Fundamentos de la Mecánica de Sistemas de Partículas*, Editorial Universidad Nacional de Córdoba, (2000).
- [7] Einstein, A., "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik*, 17, (1905). Ver traducción al inglés: "On the electrodynamics of moving bodies" en: *The Principle of Relativity*, Dover Pub. Inc. (1952).
- [8] Merzbacher, E., *Quantum Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc. (1970).
- [9] Bogoliubov, N.N. & Shirkov, D.V., *Introduction to the theory of quantized fields*, third edition, John Wiley & Sons, Inc., (1980).
- [10] Hawking, S.W. & Ellis, G.F.R., *The large scale structure of space-time*, Cambridge University Press, (1973).
- [11] L. Bombelli, J. Lee, D. Meyer and R. Sorkin, *Phys. Rev. Lett.*, 59, 521, (1987).
- [12] Moreschi, O.M., "Sobre la posible naturaleza discreta del espaciotiempo y sus implicaciones en cosmología", *Epistemología e Historia de la Ciencia*, Vol. 5, 317, (1999).
- [13] Moreschi, O.M., "Causal Statistical Mechanics Calculation of Initial Cosmic entropy and Quantum Gravity Prospects", *Int. J. Theo. Phys.*, 38, 1373, (1999).
- [14] Popper, K.R., *Conjeturas y refutaciones, el desarrollo del conocimiento científico*, Ed. Paidós, 4ta reimpresión, (1994). Ver pág. 266.

\* Nota de los Eds. Este trabajo corresponde a las X Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia, y aparece en este volumen para subsanar errores de impresión en el volumen anterior