

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XVII JORNADAS
VOLUMEN 13 (2007)

Pío García
Luis Salvatico
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



Candidatos para la teoría de campo de fuerza: en busca de una comprensión del concepto¹

Penélope Lodeyro*

El “campo de fuerza” hizo su presentación como término técnico en la física a comienzos del siglo XIX, sin embargo, su gestación abarca un largo proceso de cristalización del concepto. El presente trabajo está dedicado a elucidar el origen de esta noción, a la vez que intenta llegar a una definición conceptual satisfactoria sensible al análisis histórico. Por ello, resulta de interés estudiar los sistemas de tres destacados filósofos naturales Newton, Euler y Faraday en tanto se ocuparon del problema de la transmisión de la acción. En particular, analizaremos si sus formulaciones pueden ser consideradas como genuinos candidatos para una teoría de campo de fuerza. La valoración de los criterios propuestos en cada caso contribuirá a esclarecer la comprensión del significado del concepto.

En primer lugar, abordaremos una disputa entre H. Stein y M. Hesse acerca de la validez de interpretar como una teoría de campo la noción de *atracción* tal y como la desarrolló Newton en su teoría de la gravedad. ¿Podemos decir que encontramos en dicha noción las propiedades del concepto de campo de fuerza aunque sabemos que su uso técnico se especificaría más adelante? La respuesta a esta pregunta dependerá, en última instancia, de considerar si el concepto de campo es compatible o no con el de *acción a distancia*. En segundo lugar, consideraremos la propuesta de Hesse según la cual el origen del concepto de campo se encuentra en el sistema de Euler. Por último, analizaremos brevemente el trabajo de Faraday bajo la tesis de que en su trabajo experimental en electromagnetismo y su noción de líneas de fuerza encontramos, por primera vez, una formulación conceptual sólida del concepto de campo de fuerza.

Criterios para una teoría de campo

Howard Stein considera que los principales rasgos de la noción moderna de campo ya estaban presentes en la noción de *atracción* newtoniana.² La ley de gravitación de Newton especifica una función que toma un valor definido en cada punto en el espacio que rodea un cuerpo gravitatorio prescribiendo cómo un segundo cuerpo se movería en ese punto. Se asocia una *disposición* definida a cada punto en el espacio, para Stein esto sería necesario y suficiente para constituir una teoría de campo. Un sistema será un buen candidato a una teoría de campo simplemente por asignar a cada punto de un espacio dado una disposición causal especificada cuantitativamente, una acción potencial, que se ejercería en cualquier cuerpo que ocupara tal punto.

Stein sostiene que “en las investigaciones de la gravitación de Newton, la noción de campo cumple un papel insoslayable en la evaluación inductiva de evidencia.”³ En el formalismo de los Principia, decir que “una fuerza está actuando sobre un cuerpo” o que “un cuerpo es atraído por otro” es equivalente a decir sólo que un cuerpo se moverá de una determinada manera si nada se lo impide, o más precisamente, que el cuerpo tiene una disposición a moverse de ese modo en una configuración de cuerpos. Tal disposición calificaría como real en el sentido de que la

* UNC

gravedad disposicional no sería una cualidad oculta, sino una manera testeable de una parte del comportamiento de todos los cuerpos.

Seguramente, Newton no hubiera acordado en admitir como reales tales disposiciones. Sabía que una lectura disposicional de la gravedad prescindía enteramente del tema causal, de cómo tiene lugar la acción.⁴ Se limitó a la noción de acción a distancia porque pese a todos sus esfuerzos no encontró una explicación física (causal) satisfactoria para el fenómeno gravitatorio.⁵

El otro argumento de Stein va aún más lejos en el plano de las interpretaciones. Sostiene que un cuerpo no era para Newton más que “cierta región del espacio dotada de ciertas propiedades”, la más destacada de ellas sería la impenetrabilidad. Dado que esta propiedad está presente en todo punto o no lo está, Stein considera que lo más natural es pensarla como una “función doblemente valuada en el espacio” y, por lo tanto, como una teoría de campo.⁶ Su conclusión es: “No es una metáfora, sino una verdad literal que la metafísica de Newton de los cuerpos materiales reduce la noción de materia a la noción de campo”. Sólo diremos al respecto que Newton efectivamente trata la impenetrabilidad como una propiedad que define los cuerpos, pero la misma no admite grados ni tiene ningún efecto más allá de los cuerpos mismos, características fundamentales de la noción de campo. Por lo tanto, hablar de “campo” con relación a la propiedad de impenetrabilidad simplemente parece un despropósito.

Por lo tanto, nos centraremos en el primer argumento. Para Stein, el status ontológico del campo está asegurado por la simple asignación a cada punto en un espacio dado de una cantidad determinada de una disposición causal específica. Hesse critica esta postura y considera este criterio como insuficiente.⁷ La noción de campo de Stein como un constructo de puntos disposicionales es una definición demasiado amplia. Como veremos, puede contener modos muy diferentes de concebir la acción entre los cuerpos que deberían permanecer diferenciados en el significado del término, en particular, es compatible tanto con la noción de acción progresiva continua como con la noción de acción a distancia.

Hesse comienza reconociendo a Euler como “el real fundador de la mecánica de los medios continuos”: triunfó allí donde Newton había fracasado, llegó a formular un modelo matemático abstracto de los movimientos en un fluido.⁸

A partir de sus estudios en hidrodinámica la noción de una teoría de campo tomó forma por primera vez. Un campo, en la física matemática es considerado generalmente como una región del espacio en la cual cada punto (con posibles excepciones aisladas) es caracterizado por alguna cantidad o cantidades que son funciones de las coordenadas espaciales y el tiempo, la naturaleza de tales cantidades dependerá de la teoría física de la que estemos hablando. En manos de Euler, la hidrodinámica se convirtió en una teoría de campo, el campo de movimiento de un fluido siendo caracterizado por la velocidad del fluido en cada punto.⁹

Aquí la metáfora es de una substancia que fluye, con propiedades materiales específicas y las ecuaciones son ecuaciones de la velocidad de un fluido. Hesse es directa en este punto: ¿por qué el potencial gravitacional newtoniano debería ser considerado como una teoría de campo (especialmente después de los desarrollos matemáticos llevados a cabo por Lagrange, Laplace y Poisson)?:

Hay una diferencia física entre el campo gravitacional y el campo de velocidad de un fluido. En este último caso, la función de campo es una propiedad efectiva del material en todo punto del campo, pero en el caso gravitacional la función potencial "V", es potencial en el sentido de que no describe necesariamente una propiedad física del campo, ya que podría tener valor en el espacio vacío; describe una propiedad potencial, llamada la fuerza que sería ejercida si una pequeña masa fuera introducida dentro del campo en ese punto.¹⁰

Aunque aquí se habla de "campo" en referencia a la concepción newtoniana, queda claro que en este caso se refiere a un sentido acotado del término y que en última instancia no resulta confuso. Una propiedad de campo debe tener por sí misma una *realidad física* que las disposiciones en el espacio vacío no tienen.

El campo de velocidad en un fluido de Euler postula un medio material que exhibe propiedades distintas de la velocidad, propiedades que pueden observarse independientemente. Hesse propone como criterio de realidad física del fluido y por lo tanto, de toda teoría que aspire a ser considerada una teoría de campo, *la posibilidad de identificar otras propiedades distintas a las disposiciones especificadas por la función misma del campo* (en este caso, propiedades distintas de la velocidad). En la teoría de Euler, no hay lugar para preguntarnos si el fluido se introdujo en el sistema como un sustantivo hipotético para el verbo "fluir". Hay propiedades del fluido distintas de la velocidad que son detectables, por lo tanto, no hay dificultad en decir que el fluido transmite la acción continuamente de lugar en lugar. En cambio, el campo gravitacional no parece exhibir propiedades distintas de la potencialidad para ejercer fuerzas atractivas sobre las masas que en él se introducen, por lo que debería considerarse como un mero artilugio matemático que describe una acción a distancia.¹¹

Coincidimos con Hesse en la necesidad de introducir la "realidad física" dentro del significado del concepto de campo, pues las meras disposiciones en el espacio no conservan la distinción entre acción continua y acción a distancia. Consideramos central este punto porque precisamente la búsqueda por establecer *cómo* se lleva a cabo la *acción continua* (en oposición a la acción a distancia) es la que nos permite unir con un hilo conductor la construcción del significado del concepto de campo.

En busca de una definición

Consideramos que el origen del concepto de campo se encuentra en las investigaciones en torno a la electricidad y el magnetismo de M. Faraday. Su sistema atribuía *existencia física* a los "intermediarios" que intervenían en la transmisión de las fuerzas en la inducción eléctrica y magnética en tanto los postulaba como *esenciales a la descripción* del fenómeno. Con su teoría hubo un giro hacia el aspecto "físico" que iba más allá del mero nivel disposicional de los *Principia*, pero que además permitiría a la ciencia rasguñar la base ontológica del concepto en un modo testeable a través del trabajo experimental y no meramente especulativo (diferenciándose en este sentido incluso del sistema de Euler). Este giro le estaba vedado a Newton desde el comienzo, dado que la mecánica de los *Principia* no contemplaba las explicaciones causales; mientras que los fenómenos de la luz y el color le permitieron postular con algún grado de plausibilidad estructuras como "rayos de luz", "corpúsculos de luz" y "vibraciones del éter", el fenómeno de gravitación permaneció en el plano de la acción a distancia, sin permitir ningún tipo de desarrollo ontológico¹²

Faraday utiliza al menos dos definiciones del concepto de campo no incompatibles entre sí cuya consideración cronológica nos muestra su intento de aclarar el significado de “acción progresiva continua”. Su concepción inicial era más bien una especulación vaga acerca de la posible localización de la acción en el espacio que rodea las cargas y los cuerpos. El problema era interpretar el fenómeno de las rotaciones electromagnéticas. Faraday había descubierto que al acercar un cable por el que circulaba una corriente eléctrica a una aguja imantada, ésta giraba continuamente en torno a su eje y el cable tendía a girar en torno a la aguja. De esta forma comprobó experimentalmente la disposición circular de las fuerzas magnéticas *en el espacio*, y que el polo magnético y el cable tendían a moverse uno alrededor del otro. Pensó que el movimiento para el caso de las rotaciones se debía a cierta actividad entre el espacio que rodeaba a la aguja y el cable conductor. Así, comenzó a dar un sentido concreto a la noción de “actividad en el espacio” y dirigió su búsqueda experimental a confirmar sus ideas de la transmisión continua de la acción y en contra de la concepción de la acción a distancia. Faraday se daba cuenta de que, si bien sus interpretaciones podían ser especulativas, la noción de acción a distancia no lo era en menor medida.

Desarrolló el significado de “transmisión progresiva continua” bajo el intento de aclarar mediante qué procesos podía darse tal acción.¹³ Para articular su noción se valió de la imagen visual concreta de las limaduras de hierro esparcidas alrededor de un imán y desarrolló su noción de “líneas de fuerza”. Ésta es la segunda acepción del concepto de campo, surgió a partir de su descubrimiento de la inducción electromagnética: el problema inicial era dar cuenta de por qué el cambio en la fuerza magnética produce una corriente mientras que una fuerza constante no.¹⁴ La imagen articuladora tuvo origen a partir de un segundo problema, cómo emerge una corriente en un conductor simplemente a partir de su movimiento o de la fuente magnética. La respuesta fue que en este caso, la inducción se produce por “cortar” las líneas de fuerza al mover uno de los dos, el conductor o la fuente magnética, o por el movimiento de las líneas a través del conductor.

El campo de fuerza unificado de Faraday es una concepción en la cual todas las acciones son transmitidas a través de las líneas de fuerza, y las partículas materiales son los puntos de convergencia de las líneas; como toda partícula está conectada con toda otra, llegó a explicar la transmisión continua de la fuerza en un medio dieléctrico. La acción electrostática se da a través de “partículas contiguas” (es progresiva), pero estas partículas están realmente conectadas por las líneas de fuerza. Durante su investigación, en el caso de la inducción magnética, Faraday sintió que tenía evidencia, aunque no definitiva, a favor de la *existencia* de las líneas de fuerza. Su noción prescindía de un éter, pues si las líneas de fuerza eran sustancias ellas mismas no había necesidad de plantear un sustrato a través del cual se transmitiera la acción.

En tanto emergió de su trabajo experimental, la noción de campo de Faraday se constituyó como una potente base teórica para explicar la interacción entre las fuerzas eléctricas y magnéticas. Sin embargo, se necesitó del formalismo matemático de Maxwell para formular las leyes que rigen a estas fuerzas. En su sistema la noción de campo se convierte en *esencial* para la descripción de las acciones eléctricas y magnéticas: a partir de sus ecuaciones se deduce el *tiempo de retraso* en la transmisión de la acción, es decir, ciertos procesos físicos deben tener lugar en el espacio interviniente. Faraday sabía ya que esta era la prueba decisiva para legitimar su concepción¹⁵, pero no consiguió evidencias experimentales en su favor. Maxwell tomó la

concepción de líneas de fuerza de Faraday y dándole una formulación matemática la convirtió finalmente en una alternativa viable a la noción de acción a distancia.

La teoría del campo electromagnético de Maxwell condujo a la consecuencia inesperada de que la velocidad de las ondas electromagnéticas propagadas en el éter era la misma que la de la luz. De este modo condujo a la unificación de la óptica y del electromagnetismo que se fundamentaba en una teoría mecánica del éter, su teoría electromagnética de la luz. En 1888, H. Hertz detectó experimentalmente las ondas electromagnéticas, lo cual se contempló como una impactante confirmación de la teoría del campo electromagnético.

El concepto de campo electromagnético, después de Faraday y Maxwell provee una descripción de la transmisión de la acción de las fuerzas eléctricas y magnéticas y una explicación de cómo es posible esta acción continua y progresiva. En particular se constituye como concepto científico en tanto responde cuestiones como: qué hace, cómo lo hace, qué efectos produce, qué tipo de cosa es, y cómo puede identificarse/localizarse.

Consideraciones finales

Los significados de los términos científicos se encuentran firmemente enraizados en las prácticas científicas, y como hemos visto, el concepto de campo emergió precisamente en oposición a la noción de acción a distancia que fue reemplazada por una explicación *propriadamente física* que implica más que meramente “salvar los fenómenos”; en este sentido, diremos que el significado del concepto de campo debe implicar la dimensión de “realidad” física, las meras disposiciones en el espacio vacío resultan insuficientes para considerar una teoría *propriadamente* como una teoría de campo. El concepto de campo constituyó un nuevo modo de conceptuar las acciones físicas. Precisamente, la búsqueda por establecer cómo, mediante qué procesos se lleva a cabo la acción continua en el espacio, nos permite unir con un hilo conductor la familia de sentidos que conformaron el desarrollo de la construcción del significado del concepto desde Faraday a nuestros días.

Por lo tanto, coincidimos con M. Hesse en que la distinción entre acción a distancia y acción continua debe permanecer dentro del significado del término y que es necesario incluir la dimensión fisico-causal. El sentido que da Stein al concepto resulta demasiado amplio, las meras disposiciones para el cálculo no bastan. Ahora bien, como señala correctamente Hesse, Euler introduce con su modelo matemático un sentido físico del término; sin embargo, fue Faraday quien introdujo la dimensión experimental en el significado del término, le otorgó un sentido testeable y no meramente especulativo.¹⁶ De alguna manera podría decirse que “ató” el significado con el mundo.

En este sentido, fue Faraday el primero en considerar como esencial a la descripción de las acciones eléctricas y magnéticas los procesos físicos ocurriendo en el espacio que rodea a las cargas y los cuerpos. Así, definimos el concepto de campo de fuerza como ciertas modificaciones *físicamente reales* de un medio cuyas propiedades determinan la acción dinámica que se lleva a cabo.¹⁷ Esto implica que algunos procesos tienen lugar en el espacio que rodea los cuerpos involucrados en la acción y Faraday intentó descifrarlos experimentalmente.¹⁸ Si no hubiera sido por esta “prematura” insistencia (recordemos que se necesitaría del aporte de Maxwell para instaurar la realidad física del concepto) en buscar argumentos a favor de la *existencia física* de las acciones eléctricas y magnéticas a través del espacio el concepto de campo en su *sentido*

físico - experimental seguramente habría demorado más tiempo en aparecer en el horizonte de la física.

Notas

¹ Centro de Investigaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto de investigación titulado "El desarrollo de la filosofía mecánica desde la publicación de *Principia Mathematica* (1687) hasta el surgimiento de la teoría de campos", con subsidio de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la U.N.C.

² Cf. Stein (1970) p 3.

³ Stein (1970) p 24.

⁴ En el Escolio General de sus *Principia*, admite que aún no ha logrado descubrir *la causa de esas propiedades de gravedad*, de aquí su famoso dictum '*hypotheses non fingo*'.

⁵ En su último intento de explicación sostuvo que la acción se daba a través del espacio vacío de materia, pero que perfectamente podía estar lleno de un éter o de "algo" inmaterial.

⁶ Stein (1970) p 3.

⁷ Cf. Hesse (1960) y (1970).

⁸ Hesse (1961) p 192.

⁹ *Idem*.

¹⁰ *Idem ant.* P 66.

¹¹ Este mismo criterio, fue utilizado por los físicos del s XIX para evaluar el status de las teorías de campo.

¹² Debemos destacar que Faraday tampoco pudo explicar con su teoría el fenómeno de la gravitación. Una revolución conceptual que implicaría incluso las nociones de espacio y tiempo sería necesaria primero, para llevar a cabo este desarrollo.

¹³ Primero postuló un estado de tensión del medio para resolver la cuestión, el estado electrotrónico, pero no pudo detectarlo experimentalmente.

¹⁴ Oersted había descubierto que una fuerza eléctrica constante inducía un efecto magnético. Por simetría, se intentó probar sin éxito que una fuerza magnética constante producía un efecto eléctrico.

¹⁵ Por ello, enfatizó otro criterio a favor de su concepción, tenía que ver con que la transmisión de la acción fuera afectada por cambios materiales que ocurrieran en algún lugar del espacio interviniente, por ejemplo la curvatura de las líneas de fuerza o la alteración de las polaridades en los casos de inducción. Sin embargo, este criterio resultaba insuficiente, la curvatura de las líneas podía explicarse en términos de acción a distancia como la resultante de las fuerzas ejercidas.

¹⁶ En este sentido, caben legítimas dudas acerca de postular el origen del concepto de campo con el sistema de Faraday por cuanto Oersted había planteado ya que el espacio debía considerarse como intermediario en las acciones electromagnéticas en el marco de su descubrimiento de la inducción eléctrica. Hemos priorizado el sistema de Faraday porque llevó a cabo la mayoría de los experimentos en este campo y por el papel fundamental de su noción de líneas de fuerza en tanto fueron tomadas por Maxwell para su elaboración matemática.

¹⁷ En esta definición coincidimos con N. Nersessian (1984) p 34.

¹⁸ Es importante aclarar que Faraday no restó importancia al trabajo teórico, como hemos mencionado a partir de sus experimentos desarrolló su noción de líneas de fuerza, y la historia de la ciencia nos muestra también que su trabajo especulativo guiaba su trabajo experimental. Aquí hemos enfatizado su aporte fundamental al significado del concepto de campo de fuerza por cuanto a su cara experimental.

Bibliografía

- Faraday, M. (1931), *Experimental researches in electricity*, Vol. 11, Enciclopedia británica (1983).
- Harman, P M. (1982), *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*, Alianza Ed. (1990).
- Hesse, Mary (1961), *Forces and Fields*, Nelson Editorial (1961).
- (1970), *Historical and Philosophical Perspectives*, Historical and Philosophical Perspectives in Science (1970).
- Nersessian, Nancy (1984), *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, Kluwer Academic Publishers (1984).
- Newton, Isaac (1687) *Principia*, University of California Press, Berkeley (1962).
- Stein, Howard (1970), *On the notion of a fields in Newton, Maxwell and beyond*, Historical and Philosophical Perspectives in Science (1970).