

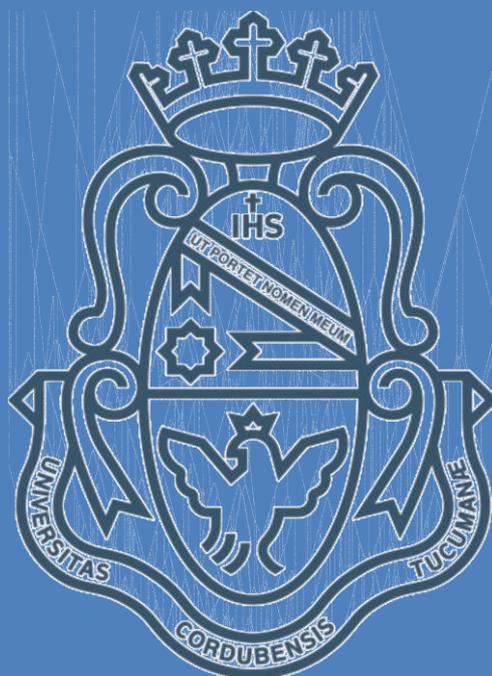
# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XXII JORNADAS

VOLUMEN 18 (2012)

Luis Salvatico  
Maximiliano Bozzoli  
Luciana Presenti

Editores



ÁREA LÓGICO-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 descubrimiento de la onda electromagnética- hidrodinámica y el rol heurístico de la analogía

Raúl Alberto Dean \*

## 1. Introducción

En este trabajo se analiza el rol heurístico que tuvo la analogía en el proceso de descubrimiento de la onda electromagnética – hidrodinámica. Se considera el periodo 1942-1954, y se muestra que el empleo de modelos analógicos posibilitó, mediante razonamiento analógico, la obtención de nuevo conocimiento. Actualmente se enfatiza el interés en el análisis de casos históricos puesto que se considera que ofrecen buenas razones para revalorizar filosóficamente el tema del descubrimiento científico (Bárceñas, 2002).

La física del plasma y sus aplicaciones tuvo un hito importante cuando Hannes Alfvén (1908–1995), en un breve trabajo publicado en la revista *Nature* en 1942, postula mediante un modelo teórico altamente simplificado la existencia de un nuevo tipo de ondas. Su trabajo significó la apertura de un nuevo campo de la física, el de la Magneto-hidrodinámica (MHD), como una combinación de dos disciplinas bien desarrolladas en ese momento histórico: la dinámica de fluidos y el electromagnetismo (Fälthammar, 2007).

Básicamente el descubrimiento de Alfvén fue que la interacción mutua entre fuerzas electromagnéticas y fuerzas hidrodinámicas, en un fluido eléctricamente conductor que está sometido a un campo magnético, da lugar a un cierto tipo de ondas, llamadas ondas magneto-hidrodinámica, que pueden desplazarse en la dirección del campo magnético exterior, llevando con ellas un campo magnético inducido así como un campo de velocidad (Lundquist, 1949, p.1805).

Se necesitaron seis años para que la existencia de estas ondas fuese aceptada y siete para obtener las primeras observaciones. Después de un seminario dictado por Alfvén en 1948 en Chicago, Enrico Fermi manifestó su apoyo a tal descubrimiento logrando adhesiones de la comunidad científica.

La primera observación de este tipo de ondas se concretó con experimentos de laboratorio realizados por S. Lundquist (1949) con mercurio magnetizado, donde se produjeron estas ondas con una velocidad que se aproximaba a la predicha por Alfvén. En 1950 Alfvén publica su libro *Electrodinámica Cósmica*, donde detalla las ondas hidromagnéticas y discute su aplicación a los plasmas de laboratorio y el espacio. En 1952 Bostick y Levine experimentan con helio ionizado obteniendo una corroboración adicional sobre la existencia de dichas ondas. En 1954 Bo Lehnert produce este tipo de ondas en sodio líquido.

## 2. Un descubrimiento desde la teoría

El problema específico fue cómo explicar las manchas solares y el ciclo de manchas solares; era bien sabido que las manchas solares tenían fuertes campos magnéticos (Fälthammar, 2007, p.1605). En búsqueda de una explicación Alfvén entiende que el campo magnético observado en las manchas solares deriva de corrientes eléctricas en el plasma solar, y que estas corrientes y campos magnéticos en conjunto deben dar lugar a fuerzas que afectan el movimiento de este plasma, que a su vez, induce campos eléctricos en una manera cíclica.

---

\* UNR.C, rdean@ing.unrc.edu.ar

Para su explicación propuso un modelo altamente simplificado suponiendo un líquido perfectamente conductor (conductividad eléctrica infinita), con permitividad y permeabilidad magnética unitarias, e inmerso en un campo magnético homogéneo  $H_0$ . Con este modelo fue capaz de formular la interacción mutua entre los campos electromagnéticos y el movimiento del fluido. En su breve nota a Nature expone su teoría con el siguiente argumento:

Si un líquido conductor es colocado en un campo magnético constante, cada movimiento del líquido da lugar a una fuerza electro motriz (f.e.m.) la cual produce corrientes eléctricas. Debido al campo magnético, estas corrientes originan fuerzas mecánicas que cambian el estado de movimiento del líquido. Así un tipo combinado de onda electromagnética – hidrodinámica es producida la cual, hasta donde yo sé aún no ha llamado la atención. (Alfvén, 1942, pp.405-406)

El fenómeno lo describe con las ecuaciones electrodinámicas junto a la ecuación hidrodinámica y la ley de fuerza de Lorentz. Con el fin de estudiar una onda plana, deduce una ecuación diferencial, que de acuerdo a unidades (cgs), se leía como<sup>i</sup>

$$\frac{\partial^2 H'}{\partial z^2} = \left( \frac{4\pi\rho}{H_0^2} \right) \frac{\partial^2 H'}{\partial t^2} \quad (1)$$

donde  $H'$  es la intensidad de un campo magnético variable y  $t$  es el tiempo. Expresa que la misma significa una onda que se desplaza en la dirección  $z$  con una velocidad  $V$  expresada por

$$V = \frac{H_0}{\sqrt{4\pi\rho}} \quad (2)$$

la cual es función de la densidad de masa,  $\rho$  del medio y de la intensidad del campo magnético constante  $H_0$ . Para valores de los parámetros supuestos como razonables para una región del sol a una distancia de  $10^{10}$  cm debajo de la superficie solar, esto es a 100.000 km, donde la causa original de las manchas solares se podría encontrar, dedujo una velocidad de propagación de 60 cm/s, y señaló que es aproximadamente la velocidad con la que la zona de la mancha solar se mueve hacia el ecuador solar durante un ciclo de las manchas solares. De esta forma concluye que: «Así es posible que las manchas solares estén asociadas con un campo magnético y con perturbaciones mecánicas que proceden como una onda electromagnética - hidrodinámica». De esta manera, los “datos” brindaron una primera “corroboración” a su teoría que permitía dar una explicación al problema.

### 2.1 Un caso de metáfora

Si bien es conocido que Alfvén descubrió este tipo de ondas, no lo es el hecho de que en el mismo tiempo propusiera un concepto que resultó importante en Magneto hidrodinámica, el concepto de “congelado en líneas de campo magnético” o “congelado en el campo magnético” (Stern, 1966, p.148)<sup>ii</sup> (Fálthammar, 2007, pp. 1604-1605) o “campo magnético congelado” como generalmente se lo conoce.

En el mismo año de su nota en Nature, y en un trabajo más extenso publicado en una revista sueca, hizo notar que «la materia del líquido está “pegada” o “congelada” a las líneas

de fuerza, constituyendo una serie de cuerdas» (Fälthammar et al, 2006). Las consecuencias derivadas de la idealización del fluido como conductor eléctrico de conductividad infinita, interactuando con un campo magnético constante, le condujo a proponer este concepto que tuvo una función heurística de importancia.

Y en esta frase, se encuentran términos que nos remiten a la metáfora. Una metáfora, de acuerdo a Daniela Bailer-Jones, es “una expresión lingüística en la que al menos una parte de ella es transferida desde un dominio de aplicación (dominio fuente), donde es común, a otro (dominio blanco) en el que es inusual, o era probablemente inusual antes, cuando podría haber sido nuevo” (*cit. en Rivadulla, p. 191*). Analizando la frase de Alfvén podemos interpretar que el término “congelado” es transferido desde un dominio común de aplicación (líquido) a otro dominio donde esto es inusual, e imposible en este caso (líneas de campo magnético).

De acuerdo a Max Black una frase es un caso de metáfora cuando implicamos que al menos una palabra se usa metafóricamente en ella, y que al menos una de las palabras restantes se utiliza con valor literal, y donde llamar a una frase un ejemplar de metáfora es decir algo acerca de su significado, no sobre su ortografía, su estructura fonética ni su forma gramatical (Black, 1966, p.39). De acuerdo a este autor al menos tres clases de metáforas se pueden identificar y se pueden clasificar como ejemplares de sustitución, de comparación o de interacción, siendo la última la que tendría importancia en filosofía, ya que las dos primeras podrían sustituirse por traducciones literales sin pérdida del contenido cognoscitivo.

Denomina enfoque sustitutivo de la metáfora a cualquier tesis que sostenga que “las expresiones metafóricas se utilizan en lugar de otras expresiones literales equivalentes a ellas”; enfoque comparativo de la metáfora para quien sostenga que “la metáfora consiste en la presentación de una analogía o semejanza subyacente”; y por último se refiere al enfoque interactivo de la metáfora, cuya idea básica la expresa al afirmar: “... cuando utilizamos una metáfora tenemos dos pensamientos de cosas distintas en actividad simultánea y apoyados por una sola palabra o frase, cuyo significado es una resultante de su interacción” (Black, 1966, pp.42-45-48).

De esta manera, y considerando las dos primeras clasificaciones, la frase «la materia del líquido está “pegada” o “congelada” a las líneas de fuerza, constituyendo una serie de cuerdas» puede ser identificada como un ejemplar de metáfora. El término “congelado” se utiliza metafóricamente, y puede ser sustituido por un equivalente literal proveniente del marco teórico, mucho más extenso que esta única palabra. Adicionalmente se presenta una analogía cuando se expresa “constituyendo una serie de cuerdas”. En consecuencia la frase, como caso de metáfora, puede ser asociada tanto como un ejemplar de sustitución como de comparación.

### 3. El recurso a la analogía en el desarrollo experimental

La analogía tuvo su lugar en el desarrollo experimental puesto que el tema de estudio implicaba conocer estructuras y mecanismos de funcionamiento que sólo podían ser observados por sus consecuencias. Si bien los datos utilizados daban apoyo a la existencia de una onda electromagnética - hidrodinámica, a la fecha de publicación de la teoría tal onda no se había observado y su demostración experimental presentaba dificultades, puesto que los plasmas, similares al solar, raramente ocurren en forma natural sobre la tierra y la tecnología

de la década de 1940 tenía una capacidad limitada para producir plasmas de alta temperatura (Falthammar, 2007, p.1604)

En la semántica de su teoría hizo referencia al comportamiento de un líquido conductor, y un fluido en ese estado podía ser experimentado con la tecnología existente. No obstante, el requerimiento de conductividad infinita era una dificultad. Las primeras experiencias para producir este tipo de ondas fueron efectuadas por Lundquist, (1949), empleando mercurio. Si bien los resultados fueron cualitativamente significantes, no corroboraron decisivamente la hipótesis sobre la existencia de la onda.

Posteriormente, Lehnert (1954) experimentó con sodio líquido y corroboró más cercanamente una teoría refinada. A fines de la década de 1950, la investigación termonuclear condujo al desarrollo de capacidades técnicas para producir plasmas de alta temperatura en laboratorios terrestres, brindando una mejor posibilidad de contrastar las consecuencias observacionales de la teoría mediante experimentos realizados con plasma.

La utilización de analogías fue explícita en el trabajo de Lehnert. Afirmó que: «Cuando se estudia un líquido eléctricamente conductor en un campo magnético tanto desde un punto de vista teórico como experimental, una analogía entre líneas de campos magnéticos y cuerdas elásticas dadas por Alfvén es a menudo una herramienta conveniente». Básicamente la analogía estuvo guiada por el concepto de “flujo congelado” como lo explicita en el siguiente párrafo:

Un movimiento del líquido perpendicular al campo magnético produce corrientes inducidas y también un campo magnético inducido. Si la conductividad es infinita, el campo magnético total es “congelado” y las líneas de campo actúan como cuerdas elásticas “pegadas a” los elementos del líquido », desde el cual infería que «Virtualmente ondas magneto hidrodinámicas no amortiguadas se propagan entonces a lo largo de las líneas de campo magnético con una velocidad independiente de la frecuencia en la misma forma como las ondas elásticas a lo largo de las cuerdas (Lehnert, 1954, p.815)

Con estos conceptos y analogías como guía heurística, Lehnert desarrolló una teoría del experimento para predecir el comportamiento magneto – hidrodinámico de una columna cilíndrica de líquido, de conductividad eléctrica infinita, con un campo magnético  $B_0$  aplicado axialmente. De su trabajo se interpreta que afirma como hipótesis: «Si un campo magnético  $B_0$  es asumido a existir dentro del líquido, ningún movimiento relativo entre las líneas de fuerza magnética y el líquido es posible, ya que tal movimiento podría dar lugar a corrientes infinitamente grandes». Con dicha hipótesis argumenta que si es impuesta una perturbación en forma de torsión o giro de la base de la columna cilíndrica de líquido, las líneas del campo magnético “acompañarían” el giro acorde al concepto de “campo magnético congelado”, y si la tapa superior del cilindro se mantiene fija esto traería como consecuencia una componente  $b$  de la densidad de flujo magnético  $\mathbf{B} = 0, b, B_0$  , que sería responsable de un incremento en energía magnética  $U$  en el líquido conductor. Deduce una expresión para tal energía a partir de las leyes del electromagnetismo, y a fin de obtener una consecuencia observacional que permita decidir sobre la existencia de la onda magneto – hidrodinámica recurrió a una analogía adicional con un medio elástico.

En su teoría del experimento consideró el comportamiento dinámico de la columna de líquido conductor como similar al comportamiento dinámico de una varilla elástica sometida

a torsión con condiciones similares de contorno. La fuente de conocimiento para su analogía fue la disciplina de mecánica de los sólidos, donde la teoría de la elasticidad permitía deducir que cuando una varilla elástica con un módulo  $G$  de rigidez torsional es sometida a una perturbación en forma de torque  $M$ , se almacena energía elástica y una onda elástica torsional se transmite axialmente.

Comparando con el incremento de energía magnética en el líquido conductor establece, mediante analogía formal, un módulo elástico torsional equivalente para el líquido magnetizado como

$$G_{eq} = B_0^2 / \mu$$

De esta manera, considerando en su modelo analógico la ecuación dinámica de un disco sólido, deduce la ecuación de la onda elástica transmitida y concluye que su velocidad  $V$  de propagación se corresponde con la de la onda electromagnética – hidrodinámica de acuerdo a la expresión

$$V = G_{eq} / \rho^{1/2} = B_0 / \mu \rho^{1/2}$$

Considerando condiciones de contorno apropiadas, logró obtener una consecuencia observacional útil para poner a prueba la teoría de Alfvén.

En resumen, el modelo analógico de varilla elástica le permitió argumentar análogicamente y deducir consecuencias que pudieron ser observadas, en forma de potenciales eléctricos y en puntos de medición sobre la superficie tope de la columna cilíndrica del líquido. En su experiencia perturbó el líquido magnetizado mediante la oscilación de un disco de cobre inmerso en la base de la columna de líquido, a fin de generar ondas y poder comprobar o no su existencia. Como resultado de la experiencia las consecuencias observacionales predichas cuando la onda magnética fuese pasando por el tope, fueron comparadas favorablemente con las observaciones pertinentes, lo cual le condujo a concluir que ondas de Alfvén se propagaron a lo largo del campo magnético impuesto.

#### 4. Analogía, metáfora y racionalidad

El concepto metafórico de “campo magnético congelado” tuvo valor heurístico y racional en este proceso de descubrimiento. Se le puede asociar un valor heurístico en la fase experimental puesto que este concepto fue el nexo que le permitió a Lehnert proponer o crear una analogía adecuada con la cual logró diseñar su experimento, constituyendo un apoyo a la tesis que mantiene Black cuando al referirse al enfoque comparativo de la metáfora expresa que

la afirmación metafórica no es ningún sustituto de una comparación en toda regla ni de ningún otro enunciado literal, sino que posee una capacidad y un rendimiento propios y peculiares” y que “decir que la metáfora crea la semejanza sería mucho más esclarecedor que decir que formula una semejanza que existiera con anterioridad. (Black, 1996, p.47)

Y también a la metáfora se le puede asociar un valor racional. Al menos dos componentes de racionalidad fueron identificados por distintos autores.

La continua adaptación de nuestro idioma a nuestro mundo en continua expansión es un primer componente de racionalidad que incorpora la metáfora. Hesse enfatiza la racionalidad que introduce la metáfora cuando se refiere a lo que denomina el sentido fuerte de la predicción, el cual caracteriza como aquel donde "...nuevos predicados de observación están involucrados, y por lo tanto, en términos de la perspectiva deductiva, son requeridas adiciones al conjunto de las reglas de correspondencia." Argumenta que desde una perspectiva deductiva pura no existe un método racional de incorporar reglas de correspondencia, pero que sí es posible hacerlo desde una perspectiva metafórica. En este sentido expresa que "desde que el dominio del explanandum se describe de una manera diferente transfiriendo terminología desde el sistema secundario, es de esperar que el lenguaje de observación original sea girado en significado y extendido en vocabulario, y haciendo posible por lo tanto las predicciones en sentido fuerte." Si bien advierte que pueden no resultar verdaderas, afirma que las mismas serán racionales: "...porque la racionalidad consiste sólo en la continua adaptación de nuestro idioma a nuestro mundo en continua expansión, y la metáfora es uno de los principales medios por los cuales esto se lleva a cabo" (Hesse, 1966, pp.176-177).

La posibilidad de la reconstrucción del proceso de descubrimiento es un segundo componente de racionalidad que incorpora la metáfora a través de la analogía. Si bien este proceso de descubrimiento es oculto y subjetivamente ejecutado, es posible suponer, de acuerdo a Reinchenbach, que el mismo pueda ser parcialmente reconstruido si entendemos que una reconstrucción racional corresponde a la forma en la cual los procesos de pensamiento son comunicados a otras personas en lugar de la forma en la cual son subjetivamente ejecutados. En este sentido, los conceptos propuestos por Alfvén se constituyeron en una herramienta que utilizó para comunicar su proceso de pensamiento. La forma en la que comunica su razonamiento puede ser interpretada como correspondiendo al concepto de reconstrucción racional que mantiene Reichenbach.

El valor heurístico de la analogía se destaca en este caso histórico al menos en los siguientes aspectos relacionados al descubrimiento de estas ondas: a) en tareas de lenguaje para favorecer la comprensión y en la adquisición de nuevos conceptos, por ejemplo, mediante el empleo de la analogía de cuerdas se favorece la comprensión del fenómeno físico y la adquisición del concepto de flujo congelado, b) en tareas de razonamiento para resolver problemas, por ejemplo, el modelo analógico de vainilla elástica fue utilizado para argumentar analógicamente a fin de obtener la teoría del experimento a partir de la cual realizar experiencias para contrastar la teoría de Alfvén. Si bien al argumento analógico no está asociado un esquema de razonamiento válido, su utilización heurística es racional, como lo muestran los dos componentes mencionados de racionalidad que introduce la metáfora.

En resumen, en este caso histórico, metáfora y analogía conformaron un soporte heurístico y racional que posibilitaron el razonamiento mediante el empleo de modelos analógicos.

### **Consideraciones finales**

Si bien en lo que concierne al problema específico de las manchas solares y su ciclo, la explicación que Alfvén elaboró no fue ampliamente aceptada, las ondas que descubrió y el campo disciplinar que fundó como una nueva rama de la Física, resultaron de fundamental importancia a todo el campo de los plasmas espaciales y astrofísicos (Fälthammar, 1997,

p.411). Las analogías establecidas a través de la metáfora tuvieron un rol heurístico, como una manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos. El concepto de “campo magnético congelado” o “congelado en líneas de campo magnético” fue nexa metafórico que asistió heurísticamente en el proceso de descubrimiento de estas ondas, y fue considerado parte de la evolución de los conceptos de líneas de fuerza eléctricas y magnéticas (Leontovich, 1965).

Cada descubrimiento científico ha tenido un impacto en los conceptos fundamentales utilizados para describir y explicar el mundo natural, y este caso lo demuestra. Weinert (2005, p.4) expresa que:

En términos generales, el conocimiento físico es la interpretación del científico de los datos empíricos. Es un intento de construir una visión coherente de la naturaleza. Nuevas ideas sobre el conocimiento físico está conectado con nuevos puntos de vista de la naturaleza. El principal vehículo de conocimiento físico, tanto Maxwell como Hertz enfatizaron, es el modelo científico (...)

a lo cual se podría agregar, como es enfatizado por Hesse (1953, p.201), que es el modelo «...basado en una relación de analogía a la naturaleza.»

---

### Notas

<sup>i</sup> En su nota a *Nature*, en lugar del símbolo correspondiente a derivada parcial la nomenclatura utilizada es de derivada total (Alfvén, 1942)(Fälthammar, 2007, p.1606)

<sup>ii</sup> “El punto de vista que en astrofísica los gases ionizados a menudo pueden ser considerados como fluidos altamente conductores en los cuales “el líquido está ‘pegado’ a las líneas de fuerza” fue primero propuesto por Alfvén en 1942, quien también utilizó la expresión, en el mismo año en otra publicación, que en este caso las líneas de fuerza están <<congeladas-en>> el fluido”

### Bibliografía

- ALFVÉN H. «Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic waves» *Nature* **150**: 405-406, 1942.
- FÄLTHAMMAR C.G. «The discovery of magnetohydrodynamic waves». *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*. **69**:1604-1608, 2007.
- LUNDQUIST S., «Experimental Investigations of Magneto-Hydrodynamic Waves», *Phys. Rev.*, **76**(12): 1805-1809, 1949.
- LEHNERT B., «Magneto-Hydrodynamic Waves in Liquid Sodium», *Phys. Rev.*, **94**(4): 815-824, 1954.
- FÄLTHAMMAR C.-G. «Plasma Physics from Laboratory to Cosmos – The life and Achievements of Hannes Alfvén», *IEEE Transactions on Plasma Sciences*:409-414, 1997.
- STERN D. P. The motion of magnetic field lines, *Space Reviews* **6** pp 147-172, 1966.
- LEONTOVICH M "Evolution of the concepts of magnetic and electric lines of force" *Sov. Phys. Usp.* **7**: 877-880, 1965.
- RIVADULLA, A., Metáforas y Modelos en Ciencia y Filosofía, *Rev. de Filosofía*, **31**(2): 189-202, 2006.

- 
- BLACK, Max «La metáfora», en BLACK, M. *Modelos y metáforas*, Madrid, Tecnos, pp:36-56, 1966.
- HESSE M. B. *Models and Analogies in Science* Univ of Notre Dame Press. pp.157-177, 1966.
- HESSE M. B. «Models in Physics». *The British Journal for the Philosophy of Science*, 4(5): 198-214, 1953.
- WEINERT F. *The scientist as philosopher: philosophical consequences of great scientific discoveries*. Springer. 2005.
- REICHENBACH, H. "Chapter 1: Meaning." En. *Experience and prediction*. Chicago. University of Chicago Press, 1938.
- BÁRCENAS R. Contexto de descubrimiento y contexto de Justificación: un problema filosófico en la investigación científica. *Acta Universitaria*, mayo-agosto (12)2:48-57. 2002