

AUTORES: CRIADO PÉREZ, A., CRIADO G^a-LEGAZ, A.M. ,M^{NEZ} GOBANTES, L.
TÍTULO: El concepto de campo en su evolución histórica (I). De Newton a Maxwell
TIPO DE PARTICIPACIÓN:
CONGRESO: *XI Encuentro de Didáctica de Ciencias Experimentales.*
PUBLICACIÓN: *Actas pp. pp. 121-127*
LUGAR DE CELEBRACIÓN: E. U. M. Univ. Burgos.
AÑO: 1990

ACTAS
DE LOS
XI ENCUENTROS
DE
DIDACTICA
DE LAS
CIENCIAS EXPERIMENTALES

JESUS ANGEL MENESES VILLAGRA
(COMP.)

BURGOS, 11-14 de septiembre de 1990

DPTO. DE DIDACTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES Y GEODINAMICA.

E. U. DEL PROFESORADO DE E.G.B. DE BURGOS

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

E.U. DEL PROFESORADO DE E.G.B. (BURGOS)
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

I.S.B.N.: 84-88002-00-9
Depósito Legal: BU-114-1991



EL CONCEPTO DE CAMPO EN SU EVOLUCION HISTORICA (I). DE NEWTON A MAXWELL.

Criado Pérez, A.^(*); Criado García-Legaz, A.^(**) y Martínez Gobantes, L.^(***)

^(*) E.U. Informática. Universidad de Sevilla.

^(**) E.U. Magisterio. Universidad de Sevilla.

^(***) Centro de Formación. CTNE. Sevilla.

1. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.

Este trabajo va dirigido a alumnos de Física General de primer curso universitario. Pretende ser una reflexión sintética sobre la evolución del significado físico de campo a lo largo de la Historia de la Ciencia, realizada en un seminario de revisión y ampliación. Los prerequisites para realizar este estudio, consisten en el conocimiento del formalismo matemático del campo, del Electromagnetismo y de los conceptos introductorios de Relatividad, de Física Cuántica y de Alta Energía.

La metodología que seguiremos consiste en hacer, con un mínimo de formalismo matemático, una exposición de las ideas siguiendo las vicisitudes dialécticas que a lo largo de la Historia de la Ciencia se han planteado, hasta la formulación actual del campo, desde la perspectiva de la Física Clásica.

2. CONCEPTO FORMAL DE CAMPO.

En general, se denomina campo a una entidad escalar o vectorial, $\phi(\mathbf{r})$ o $\mathbf{A}(\mathbf{r})$, definida en un recinto R , perteneciente al Universo $U = \{\mathbf{r}, t\}$, tal que, en cada punto $\mathbf{r} \in R$ y en cada instante t , está determinado el valor $\phi(\mathbf{r}, t)$ o $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ de forma unívoca.

La comprensión del concepto formal de campo se completa con el conocimiento del álgebra de las magnitudes U o A y de las operaciones diferenciales: gradiente de un campo escalar, circulación de un campo vectorial a lo largo de una curva y flujo de un campo vectorial a través de una superficie. De todo ello, la caracterización en: conservativos y no conservativos, rotacionales e irrotacionales, así como solenoidales y no solenoidales.

Campos de interacción

Entre la diversidad de los campos que aparecen en Física, los más significativos son los que corresponden a campos de interacción, que contienen y/o transportan impulso y energía. Fundamentalmente, en la Física Clásica, nos referiremos al campo gravitatorio y al campo electromagnético.

3. EL CAMPO COMO REPRESENTACIÓN SIMBÓLICA.

La interacción gravitatoria, $G(\mathbf{r})$, está siempre presente en el mundo físico, quizá su cotidianeidad hizo que esta interacción fuera estudiada a posteriori de la interacción magnética, B , que fue la más impactante. De esta forma, Gilbert (siglo XVI), escribió "De Magnete", un tratado muy riguroso para el nivel científico de su época, en el que se describe la fenomenología del magnetismo: imanes, brújulas, etc., en particular se describe la perturbación del espacio que rodea el imán mediante líneas de fuerza materializadas por limaduras de hierro.

La cautivación de los físicos por esta interacción se manifiesta en el fallido intento de Kepler de justificar los movimientos planetarios alrededor del sol, por medio de ella. Posteriormente, en el siglo XVII, con Newton se realiza el primer estudio riguroso de la acción gravitatoria, que le lleva a los siguientes supuestos:

- La existencia de un espacio tridimensional y una cronología, absolutos e independientes uno del otro, y que constituyen un escenario pasivo e imperturbable de los fenómenos físicos.
- Las partículas materiales, inmersas en este continuo absoluto, interactúan entre sí, por fuerzas de contacto o a distancia, G .
- La interacción G entre dos partículas es "central" y "no depende del medio", obedece al principio de acción y reacción, lo que implica que cuando las partículas se atraen y están en movimiento, la velocidad de propagación de la interacción es infinita. De forma que la alteración mecánica de una cualquiera de las partículas, repercute instantáneamente en el resto.

La exitosa explicación de los movimientos planetarios y lunares, la precesión de los equinoccios, las mareas, etc. y la aportación posterior de datos cuantitativos, (medición de Γ_G por Cavendish, detección de variaciones de g con la altura y latitud,...), dieron sólida apoyatura a la idea newtoniana de que la única realidad física eran las partículas materiales que interactuaban a distancia (sin participación de un medio), propagándose estas interacciones de forma instantánea.

En este esquema el campo queda reducido a una estructura simbólica de líneas de fuerza y superficies equipotenciales carentes de realidad física, pero útiles como instrumento de cálculo de la interacción entre partículas distantes.

Esta misma línea de pensamiento es adoptada por los grandes mecánicos de fin de siglo XVIII (Lagrange, Laplace, etc.) con los que culmina la concepción del campo como ente puramente formal. Asimismo, el estudio de los fenómenos electrostáticos y magnetostáticos, realizados entre otros por Coulomb, Ampere, Poisson, Newman, Weber, etc., (todos ellos físicos de la Europa continental, de finales del siglo XVIII y primera mitad del XIX), seguirá encauzado por la autoridad de la idea newtoniana en cuanto al carácter independiente y absoluto de espacio y tiempo, y a la idea de acción a distancia, de propagación instantánea.

Sin embargo, había varias dificultades en la homologación formal de las interacciones gravitatoria, G , electrostática, E , y magnetostática, B . Quizás la más notable sea el hecho de que las dos primeras son fuerzas centrales y verifican el principio de acción y reacción;

mientras que la acción magnetostática entre cargas móviles no posee ninguna de estas dos propiedades, (ver figura 1), lo que las separa de las anteriores.

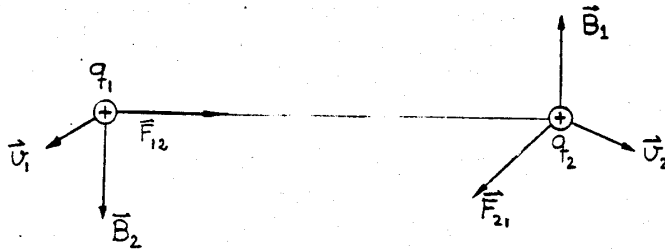


Fig. 1

4. EL CAMPO COMO REALIDAD FÍSICA.

En 1831 Faraday da a conocer sus conclusiones sobre la inducción electromagnética:

Representado B por líneas de fuerza, cuando un conductor móvil barre estas líneas, o varía el flujo de líneas abrazado por un circuito, se genera una fuerza electromotriz que no depende más que de el número de líneas de campo afectadas por unidad de tiempo. Independientemente de las fuentes (imanes o corrientes) que tienen un papel secundario, lo fundamental es la velocidad de variación del flujo, dependiente del campo, que está condicionado en gran medida por el carácter magnético del medio.

Faraday estudia los efectos sobre E de un dieléctrico introducido entre las armaduras de un condensador; así como la acción de los núcleos de diferentes materiales, llenando el interior de una bobina; llegando a la convicción del papel predominante que posee el medio, soporte del campo electromagnético (E.M.). Para el genial físico las interacciones E.M. causaban perturbaciones al medio análogas a las elásticas y en él quedaban almacenadas, sutil intuición a la idea de energía E.M. contenida por el campo.

Para Faraday sólo existen acciones próximas, que se propagan de un punto a otro del campo con velocidad finita. Las cargas estáticas o móviles son las fuentes de estas alteraciones del medio, y éste actúa sobre las posibles cargas o circuitos que se sitúan en su seno. Para Faraday el medio perturbado es el campo, que no es pasivo, sino el protagonista fundamental de la interacción E.M.

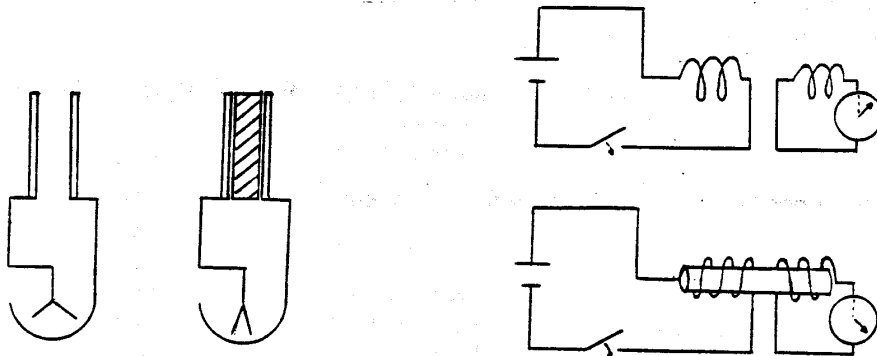


Fig. 2

Una limitación de los estudios de Faraday fue su escasa formación matemática, la cual fue superada por dos compatriotas coetáneos: Thomson (lord Kelvin) y sobre todo por Maxwell. Para Thomson, explicar un fenómeno físico consistía en realizar un modelo mecánico del mismo y, acorde con esta idea, realiza un exitoso estudio del campo B y de los osciladores eléctricos L/C (autoinducción/capacidad). Establece una analogía entre un oscilador mecánico y un oscilador L/C, efectuando correspondencias entre sus energías, sus períodos,...., tal como sigue:

x	\dot{x}	$\frac{m\dot{x}^2}{2}$	$\frac{kx^2}{2}$	$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$
q	$i=\dot{q}$	$\frac{Li^2}{2}$	$\frac{q^2}{2C}$	$T=2\pi\sqrt{LC}$

Lord Kelvin también determina la densidad de energía contenida en el campo magnetostático: $\rho = \frac{\vec{H} \times \vec{B}}{2}$. Ulteriormente, Maxwell extendería esta idea para la energía

electrostática cuya densidad quedaría como: $\rho = \frac{\vec{E} \times \vec{D}}{2}$.

Maxwell, con una excelente formación matemática y experimental, recoge la idea de Faraday de campo como realidad física y realiza un estudio sintético e innovador con el que culmina el Electromagnetismo clásico (no relativista, no cuántico). En 1861, establece un conjunto de postulados (ecuaciones de Maxwell), que explican la multiplicidad de fenómenos electromagnéticos conocidos por entonces y predice otros nuevos. De estos postulados se infiere lo siguiente:

1) Las cargas en reposo y las corrientes estacionarias generan campos: **E** (irrotacional) y **B** (solenoidal), determinados por las leyes de Coulomb y Ampere, respectivamente.

2) La génesis de estos campos puede ocurrir de forma distinta: El campo **E** (o **B**) no estacionario, engendra un campo **B** (o **E**) rotacional; de forma que las fuentes de **E** (o **B**) son las cargas estáticas (o móviles) y también las variaciones en el tiempo de estos campos. En particular, la densidad de corriente, **J**, tiene dos partes integrantes,

$\vec{J} = \rho \vec{v} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ la ya conocida por Ampere (densidad de corriente de conducción) y la

introducida por Maxwell (corriente de desplazamiento, $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$).

3) En ausencia de cargas y corrientes, en un medio dieléctrico descargado o en el vacío, la recíproca generación de campos rotacionales **E** y **B**, por variación temporal de uno y otro, da lugar a la propagación de una onda electromagnética, que en el caso más

trivial, planomonocromática, se representa por: $\vec{E} = \vec{E}_0 \times e^{j(\omega t - kx)}$ y se explica por un simple mecanismo tal como se observa en la figura

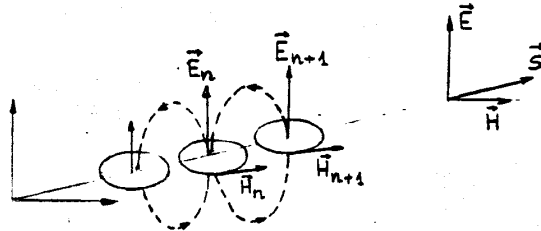


Fig. 3

En ella se observa como la variación temporal de E_n genera un H_n variable, que a su vez produce E_{n+1} , etc., con lo que la perturbación se traslada del punto P_n al P_{n+1} y así sucesivamente, dando lugar a una onda electromagnética transversal que se propaga con

una velocidad $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$. Todo ello queda teóricamente demostrado al obtenerse la

ecuación de onda de D'Alembert: $\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \times \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$ a partir de las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \wedge \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$$

La propagación de los campos oscilantes E y B conlleva un transporte de energía E.M. de forma que la potencia por unidad área normal al rayo vale el valor absoluto de $E \times H$.

4) En el vacío, la velocidad de propagación de esta onda vale:

$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, que coincide con la velocidad de la luz. (Esta había sido determinada por

observaciones astronómicas por Fizeau u Foucault en 1850). Todo ello hizo pensar a Maxwell, que la luz era una onda electromagnética.

Maxwell era consciente de que para verificar empíricamente su teoría requería campos muy intensos y oscilaciones de alta frecuencia, tal como se deduce del orden de las magnitudes que intervienen en la expresión de J :

$$\frac{d}{dt} E_0 e^{j(\omega t - \phi)} = j\omega \vec{E} \qquad J = \left| \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right| = \epsilon_0 \omega E_0 = \frac{\omega E_0}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}$$

Carente de equipos experimentales adecuados, murió sin ver materializada su predicción.

Veinte años más tarde (1881), Heinrich Hertz diseña un dipolo oscilante de alta frecuencia y un resonador que hacen las funciones de emisor y receptor de ondas E.M. Comprueba su existencia y su estructura y prueba que verifican las leyes de la reflexión, refracción, polarización, interferencia y difracción. Mediante la localización de nodos y vientres en un sistema estacionario, mide su longitud de onda. (Lo cual se esquematiza en la figura 4, que representa las posiciones en las que el disruptor del resonador da una chispa o no lo hace).

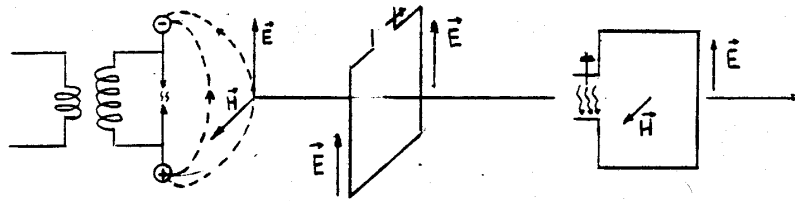


Fig. 4

Como es sabido, posteriormente se extendió el estudio de ondas maxwellianas a todo el espectro: desde las ondas hertzianas hasta los rayos.

Es fundamental recordar que una vez emitidas, estas ondas tienen vida autónoma, independiente de su fuente. Son una entidad real que transporta energía ($S = E \cdot H \text{ w/m}^2$) e impulso [$\mathbf{p} = c \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H})$], sin que éstos vayan adscritos a ninguna partícula material.

Desde Maxwell hemos de considerar dos clases de energía:

- * Una ligada a la materia, "cinética, potencial, interna.."
- * Otra, desligada de las partículas materiales: "energía radiante".

Desde Maxwell, el mundo de la Física Clásica ($F^a \ C^a$) parecía estar compuesto por dos tipos de entes reales bien diferenciados: la materia y la radiación.

El campo electromagnético de Maxwell, tan eficaz para explicar los fenómenos macroscópicos, se apoyaba en un modelo mecanicista, con el éter como medio de propagación de la interacción.

Helmholtz (1881), reconoció que las leyes de la electrolisis implicaban la naturaleza discreta del fluido eléctrico, finalmente Thomson, en 1897, probó experimentalmente el carácter corpuscular de los rayos catódicos, haces de electrones.

En 1894, Lorentz admitió que la corriente eléctrica era un movimiento de cargas elementales. Para este físico los e^- se encuentran empotrados en el éter, o moviéndose con respecto a él, generando en uno u otro caso campos \mathbf{E} y \mathbf{B} . Lorentz postula que sólo son válidos, para expresar los fenómenos E.M., los sistemas de referencia inerciales (s.r.i.) anclados en este éter, el cual coincide con el espacio absoluto newtoniano. La dificultad fundamental consistía en que al considerar distintos s.r.i. las transformaciones de Galileo, entre las coordenadas de uno y otro, no dejan invariantes las ecuaciones de Maxwell. El

creativo Lorentz inventó unas transformaciones de coordenadas (transformaciones de Lorentz) con las que las ecuaciones de D'Alembert y Maxwell conservan su forma y la velocidad de la luz, c . Para Lorentz un gran obstáculo consistía en que sus transformaciones exigían la existencia de un "tiempo local" (duraciones de un mismo proceso distintas en cada s.r.).

La teoría corpuscular de la luz de Newton había desterrado el éter de las ondas luminosas de Huyghens. Fresnel resucitó el éter agudizando su polémica existencia al atribuirle extrema sutileza y enorme rigidez, (para ser soporte de rapidísimas ondas transversales). Faraday y Maxwell utilizan el éter como apoyatura del campo y la energía. E.M. Lorentz atribuye al éter las propiedades del espacio absoluto newtoniano, analiza las dificultades que surgen al considerar los movimientos relativos respecto a él, y propugna, al menos "formalmente", una estructura espaciotemporal relativa al sistema de referencia.

En conclusión, partiendo de la interacción a distancia newtoniana, para la cual el campo era un mero instrumento de cálculo, los físicos llegaron hasta el concepto de campo como realidad física, (con la dificultad surgida de su supuesto soporte, el éter).

BIBLIOGRAFIA

- CID, F. (1982). *Historia de la Ciencia*. Planeta.
- DAMPIER, W.C. (1972). *Historia de la Ciencia...* Tecnos.
- LANDAU, L.D. (1973). *Teoría Clásica de los campos*. Reverté.
- PEREZ BALLESTAR, J. (1984). *Compendio de H^a de la C*. Univ. Salamanca.