

**CONTEXTUALIZACIÓN DEL CONCEPTO DE CAMPO COMO FUNDAMENTO
PEDAGÓGICO INTRODUCTORIO A LA TEORÍA DE CAMPOS EN MECÁNICA
CUÁNTICA**

Paul Nicolás Moreno Carrero

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Licenciado en Física

ASESORA: SANDRA BIBIANA AVILA TORRES

LINEA DE PROFUNDIZACIÓN:

LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN FÍSICA MATEMÁTICA.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA.

BOGOTÁ D.C.

2023

“If you would be a real seeker after truth, it is necessary that at least once in your life you doubt, as far as possible, all things.”

“Si tú quieres ser un verdadero buscador de la verdad, es necesario que al menos una vez en tu vida tu dudes, en la medida de lo posible, de todas las cosas.”

Rene Descartes

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	4
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA INVESTIGATIVO.	8
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.2. OBJETIVOS.....	10
1.3. ANTECEDENTES	11
CAPÍTULO II: DESARROLLO HISTÓRICO ALREDEDOR DEL CONCEPTO DE CAMPO.	13
2.1 CONCEPCIÓN CLÁSICA DE CAMPO.	14
CONCEPCIÓN ESPACIAL DE DESCARTES Y NEWTON	14
LAS LÍNEAS DE FUERZA DE FARADAY Y LA DIFERENCIA CON EL MECANICISMO A DISTANCIA DE NEWTON.	18
2.2 CONCEPCIÓN MODERNA DE CAMPO.....	24
2.3 RELACIÓN SOBRE LA CONCEPCION DE CAMPO ENTRE LA ELECTRODINÁMICA Y LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN.	33
2.4 PROBLEMAS QUE LLEVARON AL DESARROLLO DE LA MECANICA CUANTICA Y SU RELACION CON LA ELECTRODINÁMICA.	36
2.5 CONCEPCIÓN DE CAMPO EN MECÁNICA CUÁNTICA.	41
CAPÍTULO III. PROPUESTA DE CONTEXTUALIZACION DEL CONCEPTO DE CAMPO PARA LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA.....	44
CONCLUSIONES.	48
3. BIBLIOGRAFÍA	49

AGRADECIMIENTOS.

A mi madre y mi familia por brindarme su amor y apoyo incondicional en todo momento, especialmente en este camino hacia mi graduación. A mis amigos y compañeros por su amistad y compañía en momentos de alegría y desafío. A mis docentes por su guía y enseñanzas que me han llevado a alcanzar este logro. En especial, a la profesora Sandra Avila por su dedicación y ayuda invaluable a lo largo de este proceso.

INTRODUCCIÓN

A partir de las explicaciones basadas en las múltiples experiencias de Faraday, en el S. XIX se comenzó a ver una relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos que iba más allá de la acción a distancia. Maxwell al retomar las ideas de Faraday y las de otros científicos de renombre como Ampère, Ohm y Oersted, consolidó después de mucho trabajo una teoría que revolucionaría las concepciones sobre los fenómenos electromagnéticos. Este trabajo fue primordial para describir las concepciones de campo, ya que la interacción entre los cuerpos queda determinada por la perturbación que los cuerpos generan en sus cercanías y por el medio en el que están inmersos. De aquí viene entonces el concepto primordial sobre el que se centró la discusión en ese momento, el campo electromagnético.

Dejando atrás la concepción de acción a distancia como el paradigma generalizado hasta mediados del S. XIX, llegó la teoría de campos, esto permitió analizar el comportamiento del espacio mismo producto de la interacción entre dos cuerpos.

La culminación del trabajo realizado por Maxwell se vio finalizada con la formulación de sus ecuaciones, las cuales daban razón de todos los fenómenos electromagnéticos como producto del estado del medio.

Al igual que el paradigma sobre la idea de acción a distancia fue fracturado con la llegada de la teoría de campos, producto de algunos vacíos y problemas de esta primera, la concepción clásica dada por el electromagnetismo clásico de Maxwell generó problemas en el análisis de los sistemas cuánticos. En 1900, Max Planck introdujo la cuantización de la energía que absorbe la materia al ser radiada o emitida al calentarse, para obtener el espectro de radiación del cuerpo negro. Este es considerado el primer plano de la revolución cuántica ya que la teoría electromagnética clásica falla en este punto.

Esta nueva concepción fue usada luego por Albert Einstein para dar explicación al efecto fotoeléctrico y Arthur Compton la demostró gracias a sus experimentos de dispersión de rayos X en 1923.

Las propiedades de la radiación o de los fotones (vistos como partículas) como la energía o el momento están directamente relacionadas con las de las ondas correspondientes. Es decir, tanto la frecuencia angular, la longitud de onda y número de onda están relacionadas con el momento y energía de los fotones.

Este principio, visto de manera inversa fue revelado durante el mismo periodo de tiempo por experimentos similares y dieron razón a la naturaleza ondulatoria de la materia, puntualmente en la dispersión de electrones y neutrones por cristales realizados por Max Von Laue, Davison y Gerner, donde se muestran patrones de interferencia. Otra de las relaciones encontradas fue el efecto túnel, en el cual Schrödinger plantea que algunas partículas a través de barreras de potenciales no tienen la energía suficiente como para superarlas y aun así lo hacen.

La incorporación de la dualidad de la luz como partículas y ondas alteró fuertemente la metodología en física en ese momento, ya que hasta ese entonces en la mecánica clásica la descripción de las partículas se realizaba sobre sus trayectorias dadas sus posiciones iniciales, cosa que no es posible en mecánica cuántica dada la incertidumbre en pares de medidas. Ahora, en mecánica cuántica la resolución de un problema análogo sería la determinación de una función de onda específica de una partícula (cuántica), dada su configuración inicial. La magnitud al cuadrado de dicha función daría razón de una probabilidad para la posición de la partícula.

La teoría cuántica de campos a partir de la mecánica cuántica se impulsó para aplicar los principios de la mecánica cuántica a los campos electromagnéticos y por la necesidad de incorporar los principios y descripciones de la formulación de Einstein, la Teoría Especial de la Relatividad formulada en 1905.

En el presente trabajo de grado se realiza una contextualización histórica alrededor del concepto de campo y como este ha sido un concepto fundamental que yace a la base del pensamiento científico contemporáneo, buscando que dicho recorrido brinde una base metacognitiva sólida a la hora de introducirse en el estudio de la electrodinámica cuántica, teniendo de fundamento la teoría de marcos conceptuales de Gerard Vergnaud.

En el primer capítulo se presenta el contexto problemático en el que se basa la investigación, mostrando además los objetivos y antecedentes indagados para iniciar el estudio del concepto de campo.

En el segundo capítulo se hace una contextualización mediante la historia del concepto de campo alrededor de las perspectivas clásica, cuántica y cómo se hizo uso de diferentes consideraciones para unificar y crear una teoría electromagnética que permite predecir fenómenos cuánticos considerando la cuantización de la luz; la electrodinámica cuántica. Finalmente, en el tercer capítulo, se hace una breve síntesis de todo el avance histórico realizado desde la filosofía cartesiana hasta la ecuación de Dirac a partir de una herramienta

metacognitiva que a modo de síntesis se estructura teniendo de base la teoría de campos conceptuales de Gerard Vergnaud.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA INVESTIGATIVO.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Buscando el entendimiento de las teorías físicas contemporáneas en jóvenes estudiantes entusiastas con la ciencia, es importante desarrollar relaciones sobre los conceptos trabajados. Los conceptos construidos dentro de las diferentes teorías (clásicas, modernas y contemporáneas), tienen variados retos para entenderse, pues llevan consigo implicaciones que en su momento histórico se trabajaron y discutieron en la comunidad científica, al generar cambios en las interpretaciones, en las descripciones o en el paradigma de la concepción de un fenómeno particular.

Dicho cambio de paradigma puede ser expresado mediante los cambios que presentan las teorías (Gallego, 2007), un ejemplo es el cambio que se presentó cuando la teoría general y especial de la relatividad fueron aceptadas, pues en ese momento, dichos postulados sobre la geometría del espacio y el límite de velocidad de la luz refutaban planteamientos de Newton como las interacciones inmediatas en el espacio. Otro ejemplo puede ser cuando, en el análisis sobre los sistemas cuánticos, el observador es un actor importante en los resultados. Esto se puede ver claramente haciendo 3 experimentos mentales en relación con el comportamiento de los electrones (Feynman, 1965); el primero se realiza con balas, el segundo con ondas y el tercero con electrones, llegando a la conclusión que el comportamiento de éstos últimos cambia simplemente con la observación. Esto genera reflexiones sobre la realidad misma, como el cuestionamiento de la naturaleza determinista del universo. Sin embargo, la interpretación de Copenhague, en vez de cuestionarse la realidad intrínseca, cuestiona la capacidad del ser humano para la comprensión de los fenómenos.

Por esta razón la definición de conceptos a partir del cambio de teorías es una herramienta que permite el aprendizaje de dichas construcciones teóricas (Gallego, 2007). El presente trabajo busca hacer uso de esta perspectiva pedagógica para la física contemporánea, en el caso puntual, alrededor de un concepto clave al introducirse en el estudio de la electrodinámica cuántica, el concepto de campo.

En este sentido, considerando la importancia de la física contemporánea y el desarrollo de la física de campos cuánticos, su progreso en los últimos 60 años y los avances sobre el estudio de partículas es común que los estudiantes de física o de licenciatura en física sientan

temor al abordar temas relacionados, ya que estas raramente se mencionan en secundaria, la facultad e incluso hasta cursos más avanzados de física moderna, teniendo en cuenta la complejidad y nivel de abstracción que maneja. Aunque los estudiantes de pregrado al finalizar los cursos de física moderna entienden conceptos básicos sobre el comportamiento cuántico de las partículas y sus interacciones, carecen de conceptos básicos para entender esta nueva temática que se suele omitir hasta el posgrado. Este vacío suele ser difícilmente abordado dado que son pocos los textos que se encargan de presentar al estudiante un nivel introductorio del tema (Redmount, 2019).

Al hacer una revisión sobre la literatura relacionada a la enseñanza del concepto de campo, se encuentra que en electromagnetismo hay autores como (Ulloa Cataño & Paque Burgos, 2014) que desarrollan una caracterización generalizada sobre los fenómenos electrostáticos; adicionalmente, alrededor de la formalización de la teoría de Maxwell, (Blanco, 2013) hace una caracterización de dicho concepto a partir de la perspectiva histórica donde resalta la importancia y el cambio que generaron estas construcciones teóricas; y así se encuentran otros tantos trabajos que abordan el problema de la enseñanza del concepto de campo en electrodinámica clásica. Por lo que es un tema bastante trabajado en el contexto de la física clásica, pero parece no interesa mostrar qué ocurre con el contexto de la mecánica cuántica, cómo tiene cambios y similitudes que se toman para abordar el concepto desde un nivel introductorio.

Teniendo en cuenta lo expuesto, se planteó para el desarrollo del trabajo la siguiente pregunta problema

¿Cómo a partir de la teoría de campos conceptuales de Gerard Vergnaud, es posible contextualizar el concepto de campo entre la electrodinámica clásica de Maxwell y la electrodinámica cuántica?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Presentar una contextualización del concepto de campo en la mecánica clásica a la cuántica usando la teoría de campos conceptuales, haciendo énfasis en las relaciones históricas que originaron modificaciones de las teorías alrededor del concepto.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica alrededor del concepto de campo en electrodinámica clásica y electrodinámica cuántica.
- Identificar las condiciones históricas que dieron lugar a modificaciones a la teoría electrodinámica desde la concepción de campo.
- Establecer desde la teoría de campos conceptuales la contextualización del concepto de campo como material introductorio para la enseñanza de las teorías de campos en mecánica cuántica.

1.3. ANTECEDENTES

Como antecedentes se retoman los trabajos de grado de la Universidad Pedagógica Nacional y externos que hacen una caracterización del concepto de campo, desde la teoría electromagnética clásica y en electrodinámica cuántica. Estos se presentan a continuación.

- **Modelación del concepto de campo electromagnético: Caracterización del razonamiento seguido por Maxwell**

Este trabajo de grado de la Universidad Pedagógica Nacional, escrito por Juan David Blanco en el 2013, realizó una conceptualización cualitativa sobre el campo electromagnético a partir de los avances realizados por Maxwell en su teoría. Dicha conceptualización lleva a la comprensión de la dinámica de la fenomenología interna, además de las variables y cómo este científico modeló en su momento esta perspectiva desde lo matemático. Este documento resulta bastante útil en el presente trabajo de grado ya que hace una revisión análoga pero que, sin embargo, se limita a la teoría clásica.

- **Music of the Spheres: Teaching Quantum Field Theory at the Introductory Level**

En este artículo de Ian H Redmount publicado en 2019, el autor busca generar conceptos introductorios para la enseñanza de la teoría cuántica de campos. Inicialmente hace una breve contextualización histórica para definir la estructuración de dichas teorías y dado que la electrodinámica cuántica es la primera y más exitosa de ellas, este texto se desarrolla en torno a esta. La ruta seguida por este autor es pertinente para el trabajo de grado, ya que en su investigación construye nociones útiles necesarias para generar la contextualización en torno al concepto de campo desde la mirada cuántica.

- **DE LA ACCIÓN A DISTANCIA AL CONCEPTO DE CAMPO: Una discusión sobre la acción a distancia en términos del desarrollo de la teoría de campos de Faraday hasta Maxwell**

El trabajo de grado escrito por William Alejandro Prada en 2015 logra construir el contexto problemático alrededor de dos visiones opuestas, la acción a distancia en contraste con la perspectiva de campos y medios continuos. Centran dicha discusión alrededor de la importancia que tiene para la enseñanza del electromagnetismo. En sus

capítulos exponen el concepto de campo electromagnético y las dificultades que se tienen para su comprensión teniendo en cuenta la base fenomenológica. Por otro lado, en su búsqueda de contextualizar alrededor de dicha discusión muestran experiencias realizadas por Ampère y Faraday que son útiles para la comprensión de esta temática. Este contexto realizado en torno a las discusiones generadas es importante y pertinente para el desarrollo del presente trabajo de grado, ya que amplía la contextualización alrededor del concepto de campo.

- **CARACTERIZACIÓN DE LOS FENÓMENOS ELECTROESTÁTICOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE CAMPOS**

Este documento escrito por Andrea Estefanía Ulloa y David Alexander Paqué en 2014, se desarrolla sobre un cambio de paradigma. En el trabajo, de enfoque pedagógico, los autores desarrollan desde la perspectiva electroestática cómo dichos fenómenos no pueden ser expresados desde la perspectiva de acción a distancia. Hacen una descripción de cómo los cuerpos electrificados pueden ser expresados desde una perspectiva de potencial eléctrico, lo que termina introduciendo la concepción de campo. Este texto es pertinente para el desarrollo del presente trabajo pues permite ampliar la contextualización desde la perspectiva clásica en torno al concepto de campo.

CAPÍTULO II: DESARROLLO HISTÓRICO ALREDEDOR DEL CONCEPTO DE CAMPO.

En este capítulo se presentará una contextualización de las diferentes perspectivas de la concepción del espacio y su relevancia para el entendimiento de los fenómenos físicos, considerando las interacciones entre los objetos y los cambios de movimiento.

Al hablar de la concepción de espacio es común remitirse a la concepción atomista nacida y fundamentada por Epicuro y Leucipo, entendida como aquella postura que plantea que la materia está constituida bajo un cúmulo o suma de partículas (clásicas) fundamentales con cierta geometría y que cuentan con ciertas particularidades, como lo son extensión o volumen; pues si los objetos que vemos en nuestra experiencia cuentan con esta propiedad, aquellos ladrillos fundamentales de la realidad deben tenerlos también (Comesaña, 1974).

Las partículas difieren en definición de lo que sería hoy una partícula cuántica. Bajo la perspectiva de Leucipo, estas tendrían un volumen y masa particular que al juntarse permiten la construcción de los objetos más grandes. Sin embargo, las partículas cuánticas cuentan con otras propiedades dadas desde la consolidación de la teoría. Como lo son el spin, la carga, la masa, que pueden expresarse en términos de onda y partícula, etcétera.

Volviendo al concepto de espacio, dentro de esta perspectiva clásica juega el papel de mediador, como aquel teatro en donde aquellas partículas interactúan y constituyen la realidad cognoscible para los seres humanos. Bajo esta explicación se da razón no sólo de la consolidación de la materia, sino de la razón del movimiento. Y de dicha explicación fenomenológica nace la dualidad entre espacio y la materia (Candel). Este papel de espacio como mediador o recipiente en donde suceden los fenómenos ha sufrido cambios y ha sido tema de debate desde los tiempos de Demócrito (Colchero, 2021). Sin embargo, para el presente trabajo de grado se abordará desde las reflexiones dadas por René Descartes en su filosofía, cómo este concepto se relaciona con el concepto de campo y termina siendo fundamental en la teoría cuántica de campos. Todo el avance histórico aquí propuesto se enfoca en la descripción de la teoría electromagnética, teniendo en cuenta la teoría “clásica” con Faraday hasta llegar a la cuantización de la luz con Max Planck y la interpretación del campo cuántico en las más recientes teorías físicas.

2.1 CONCEPCIÓN CLÁSICA DE CAMPO.

El discurso alrededor de las explicaciones fenomenológicas de la experiencia humana y la razón de los cambios de movimiento, han sido tema de discusiones desde que la humanidad tiene memoria escrita.

Considerando cómo los conceptos de espacio, tiempo y materia se asocian a un carácter fundamental y de base para entender diferentes teorías. El generar cambios en las definiciones de dichos conceptos cambian radicalmente la comprensión de los diferentes modelos o constructos teóricos que buscan dar razón de la realidad. (Colchero, 2021).

Aunque la concepción de espacio es el concepto que será desarrollado en el presente trabajo, viene siendo discutida desde los tiempos de Demócrito y Leucipo (500 AC), la descripción abordada en el presente escrito parte de la discusión desarrollada desde el Siglo XVI con René Descartes y posteriormente por Isaac Newton, Ruggero Boscovich y Michael Faraday hasta la revolución cuántica del siglo pasado.

Al hablar de metafísica de la ciencia no se quiere abordar concepciones místicas sobre el entendimiento de la realidad. Este tipo de definiciones suelen llevar a interpretaciones pseudocientíficas que el presente documento quiere evitar. Cuando se mencione el concepto de metafísica se refiere a las construcciones y abstracciones basadas en la observación y lógica que permiten la interpretación de diferentes fenómenos y teorías científicas. La discusión sobre la relación entre la metafísica y la ciencia es aún tema de discusión, sin embargo, dicha discusión no se abordará aquí. (Soto, 2017)

2.1.2 CONCEPCIÓN ESPACIAL DE DESCARTES Y NEWTON

Dentro de “Meditaciones Metafísicas”, René Descartes, expone la dualidad entre “Res extensa” y “Res cogitans”, donde Res extensa da razón del mundo físico que cuenta con la particularidad de extensión y Res cogitans da razón de la mente, reflexiva y su alma. En su filosofía cada uno de estos dos es una exposición y muestra de la existencia de Dios. Basado en la premisa - pienso, luego existo- René Descartes plantea que no hay seguridad ni conocimiento objetivo del mundo físico. Dado que, no se puede probar la existencia de este bajo la lógica y el análisis de la experiencia humana. Sin embargo, dado que sabemos que estamos reflexionando podemos dar prueba de que nosotros sí existimos, por tanto, somos. Consecuencia de esta reflexión sólo los seres humanos contamos con un alma y los demás animales libres de

reflexión son solo “máquinas naturales”, dicho así en la quinta parte del discurso sobre el método (Henríquez, 2010).

Dentro de la fenomenología asociada al mundo físico, esta Res Extensa también es una representación de dicho Dios creador. Nosotros como seres racionales y sensibles interpretamos y caracterizamos dicha realidad buscando la objetividad y el conocimiento divino a partir del método.

Entrando propiamente en las concepciones relacionadas a la fenomenología que René Descartes tenía sobre las interacciones entre los objetos, se puede decir que dentro del mundo físico se encuentra la *concepción de extensión*. Tal concepción difiere de la dualidad materia/espacio planteado anteriormente, dado que dentro de dicha filosofía todo viene de la lógica de Dios, prácticamente como una sustancia que permea todo y lo es todo. Básicamente, el espacio y la materia son lo mismo y la experiencia humana da razón de dicha sustancia. Teniendo en cuenta lo anterior, el vacío es inexistente. (Moreno, 2018). Consecuencia de esto, las acciones que se realizan entre los objetos deben ser por contacto directo en todo caso, incluso aquellos fenómenos que parecen ser realizados a distancia son realizados por la sustancia que está en el medio. Por esta razón, la crítica sobre esta filosofía natural yacía en el cuestionamiento de los cuerpos diferenciados.

Tal y como puede verse dentro de la fenomenología asociada a la filosofía de René Descartes no hay una diferenciación entre la extensión o materia y el espacio. Todo yace dentro del mismo principio y la razón fundamental de los cambios de movimiento yace por las interacciones internas de aquella “sustancia” que viene de Dios. En un fenómeno particular a distancia, aunque parezca que apreciamos cuerpos visiblemente diferenciados interactuando desde dos lugares separados, lo que está en medio también es el papel de la interacción entre ambos.

Esta concepción transmite una idea desde Descartes, alrededor de tomar en cuenta el medio entre los cuerpos, no solo para presentar cómo se da la acción sino también para establecer que el medio en si es parte del fenómeno, no se puede excluir de él. Esta idea se verá resurgir siglos más adelante, pero antes de eso primero se estableció una teoría que mantuvo su hegemonía por varios siglos, pero que refuerza la idea griega de la relación entre materia y espacio.

Alrededor de la segunda mitad del S. XVII y la segunda década del S. XVIII Isaac Newton desarrolló una descripción formal de la experiencia humana, buscando dar razón del papel de Dios. Dentro de esta, describió un análisis riguroso del movimiento de los objetos en los

“*Philosophiæ naturalis principia mathematica*”. Se puede ver que en su primera edición no mencionó la relación de la filosofía natural con Dios, sin embargo, en su segunda edición añadió un Escolio en donde mencionaba que: “Esto concluye la discusión sobre Dios, y a tratar a Dios a partir de fenómenos es ciertamente parte de la filosofía natural” (Henry, 2007). Si bien esta perspectiva divina de la teoría y el pensamiento newtoniano no parece ir en contra de lo pensado por Descartes respecto a Dios, fueron las concepciones ontológicas de la teoría lo que generaron una gran diferencia, dado que en la teoría del movimiento mecanicista newtoniano es necesario que tanto el espacio como el tiempo sean absolutos. Dicho absolutismo de ambos términos hizo que la razón y forma de ver de las interacciones de los cuerpos se entendieran desde entonces de una manera diferente. Ahora la acción a distancia de manera instantánea era la forma de interacción entre los objetos y se ignoraba si el medio entre sí tuviese algo que ver. Esto parecía ir en contra incluso de los pensamientos propios de Newton, dado que tal y como Descartes, pensaba que la fuente del movimiento de las cosas estaba en la interacción por contacto directo (Berkson, 1985). Para la consistencia de la teoría y para dar razón a un modelo de realidad, esa perspectiva se mantuvo invariante, incluso en nuestros tiempos cuando se analizan fenómenos en los que esa teoría aún permite predecirlos.

Con el mecanicismo newtoniano el espacio es visto como un ente matemático, un espacio euclidiano de 3 dimensiones en donde todo entra a jugar. Tal y como se mencionó en la introducción del presente capítulo: como un teatro donde las cosas suceden. Dentro de dicho teatro se puede analizar y entender el movimiento teniendo en cuenta las leyes del movimiento planteadas por él. Básicamente, considerando la fuerza gravitacional generada por cada corpúsculo de materia sobre otro, de manera instantánea y a distancia.

Esta visión newtoniana fue aceptada y puesta en práctica por varios siglos y por diferentes científicos, para explicar fenómenos no solo concernientes a la mecánica y el movimiento de los cuerpos, sino en otras ramas de la física. Sin embargo, plantea un punto importante sobre el cual reflexionar y es por qué se da a distancia. El estatus en la comunidad que tenía Newton fue importante de la instauración de sus teorías y la validación por parte de sus pares, pero la cuestión estaba en el ambiente y hubo científicos que buscaron explicaciones para salirse de esta visión restringida, donde el medio es ajeno a la acción y el espacio no tiene un carácter de realidad física, sino una herramienta matemática para poder describir el fenómeno.

Para el contexto científico de la época (S. XVII) un contemporáneo a Newton, en un intento ambicioso de unificar todos los desarrollos teóricos de la época, propuso un modelo atomista,

que dentro de los avances europeos del momento no fue tomado en cuenta gracias a sus particularidades: el modelo atomista de Ruggero Boscovich. (Stolijiovic, 2015)

Bolcovich planteaba la relación entre todos los fenómenos existentes hasta ese entonces, como propiedades intrínsecas de una red que se extiende a través de todo el espacio (Stolijiovic, 2015). Dicha red estaba constituida a partir de puntos. Estos, a diferencia de las posturas atomistas planteadas hasta entonces no tenían extensión, eran simplemente puntos adimensionales. Gracias a esto, todas las interacciones conocidas e incluso la materia eran consecuencia de las interacciones de esos puntos distribuidos de manera uniforme en el espacio. Por ejemplo, cuando un objeto está visiblemente diferenciado en el espacio, es porque allí converge dicha red de puntos. Las interacciones entre cuerpos también se dan a partir de esa red, les dota de masa y de las propiedades de esa masa, como la carga. En ese sentido, dicha red es la razón de la existencia de materia y de la relación entre esta. Por tanto, la red de puntos tiene ciertas propiedades y particularidades específicas que dan cuenta de la acción.

Estas ideas fundamentales, que son previas al desarrollo del electromagnetismo, influenciaron el pensamiento de Faraday (Berkson, 1985). Además, que es un antecedente importante que buscaba unificar bajo una concepción metafísica, no solo la materia, sino todas las fuerzas de la naturaleza. Así, en su momento Boscovich, intentó describir teóricamente lo que para la época eran las fuerzas fundamentales y cómo estas se relacionaban entre sí como consecuencia de la red de puntos inextensos, cuyas propiedades se distribuían dentro de todo el espacio. (Stolijiovic, 2015)

En el S XIX, esta relación entre fuerzas distintas y cómo yacen de un principio fundamental, inspiró a Faraday, que encontró en el experimento de Oersted indicios de relación entre dos teorías correspondientes a dos fenómenos independientes de entonces: la teoría magnética y la eléctrica. Gracias a esto, a los avances desarrollados por él y por otros científicos de la talla de Ampère, Hertz, Maxwell, Lorentz, etc. dieron como fruto la consolidación del electromagnetismo. (Berkson, 1985)

En este punto cabe resaltar la importancia del experimento de Oersted y como se hizo. En 1819 el científico danés Hans Oersted planteó la siguiente experiencia.

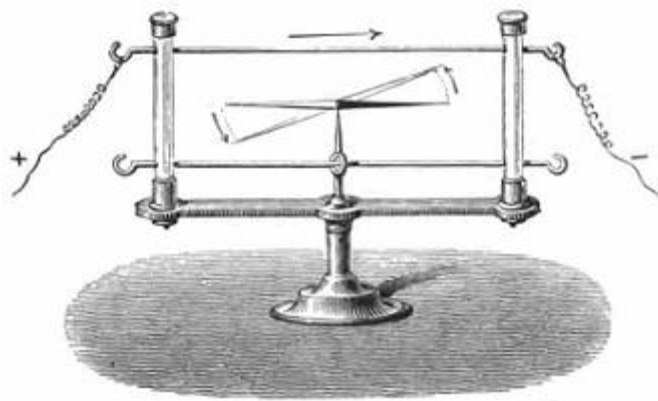


Figura 1. Experimento de Oersted. Tomado de: (Lopez, 2016)

En esta experiencia, Oersted, colocaba un circuito cerrado con una pila voltaica y una aguja imantada con un muy leve rozamiento (Figura 1).

La configuración de dichos elementos se da de tal manera que adyacente a un cable conectado a la pila colocaba una aguja imantada con el menor rozamiento posible. Cuando una corriente pasaba a través de dicho circuito la aguja imantada se veía afectada por dicha corriente. Esto implicaba directamente una relación entre dos fuerzas que hasta ese momento no tenían nada que ver una con la otra. La fuerza eléctrica y la fuerza magnética.

El experimento fue muy importante en la historia del electromagnetismo, pues fue el primer indicio que permitió ver a la electricidad y magnetismo como algo que podría tener relación entre sí, y, más allá, ser parte de una misma fenomenología. Cabe resaltar que para entonces ambas disciplinas eran ramas independientes de estudio y tal relación fue fundamental para el pensamiento metafísico y las experimentaciones de Faraday que nacieron a un nuevo corpus de conocimiento.

2.1.2 LAS LÍNEAS DE FUERZA DE FARADAY Y LA DIFERENCIA CON EL MECANICISMO A DISTANCIA DE NEWTON.

En el contexto científico del S. XIX, las ideas predominantes que daban razón a los fenómenos y creencias se basaban en el éxito de la teoría mecanicista de Isaac Newton. Bajo el análisis riguroso de dicha teoría se puede ver, de base ontológica, la concepción de espacio y tiempo absolutos que permiten relacionar los diferentes objetos y como estos cuentan con una propiedad dado su estado de movimiento; a saber, la inercia.

Sobre el concepto de inercia se relaciona un concepto que va a las leyes fundamentales de la dinámica de los cuerpos en movimiento, la fuerza. Este concepto de fuerza e inercia permitían la correcta predicción, no solo de fenómenos locales, tanto movimiento de objetos, como de

relaciones entre objetos cargados, gracias al trabajo de Charles Augustin Coulomb en el S. XVIII. En aquél trabajo Coulomb permite la correcta interacción entre objetos cargados definiendo la fuerza de interacción entre estos a partir de la ley del inverso del cuadrado de Isaac Newton.

La fuerza gravitacional de Newton se define a partir de:

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

$$G = 6.7 \times 10^{-11} Nm^2/Kg^2$$

En donde G, es la constante gravitacional, M_1M_2 son las dos masas que están interactuando entre sí y finalmente, r^2 se define a partir de la distancia entre los centros de masa de los objetos dados.

La fuerza electrostática definida por Coulomb se puede expresar de la siguiente manera:

$$F = \frac{Kq_1q_2}{r^2}$$

$$K = 9.0 \times 10^9 Nm^2/C^2$$

En donde K, es la constante de Coulomb, q_1q_2 son las cargas de los objetos interactuando entre sí y finalmente r^2 es la distancia entre los centros de carga de los objetos dados.

Como puede verse, la interacción a distancia instantánea a partir de la ley del inverso del cuadrado fue muy relevante en el contexto científico del siglo gracias a la cantidad de predicciones sobre diferentes fenómenos naturales. Tanto de fenómenos locales sino de movimientos a gran escala, como los son cometas, planetas y estrellas.

Sin embargo, Faraday, en su interés por mostrar la relación entre los fenómenos magnéticos y eléctricos, influenciado por los resultados brindados por el experimento de Oersted, la presentación de la teoría newtoniana de Ampère que daba razón de dicho experimento y por la teoría atomista de Ruiggero Boscovich, generó una perspectiva diferente de fuerza. El origen de las interacciones entre los cuerpos y la materia en sí se definió a partir de esa fuerza. Esta fuerza afectaba todo el espacio, de manera similar a las ideas de Boscovich y se veía apoyada en los fenómenos estudiados por Faraday relacionados a la electricidad y magnetismo.

Esta concepción de fuerza como concepto ontológico dentro de dicha teoría se veía soportado por experimentación sobre fenómenos eléctricos y magnéticos. La manera más visible de

observarlo está en la distribución de la limadura de hierro al ser afectada por la fuerza magnética de un imán adyacente.

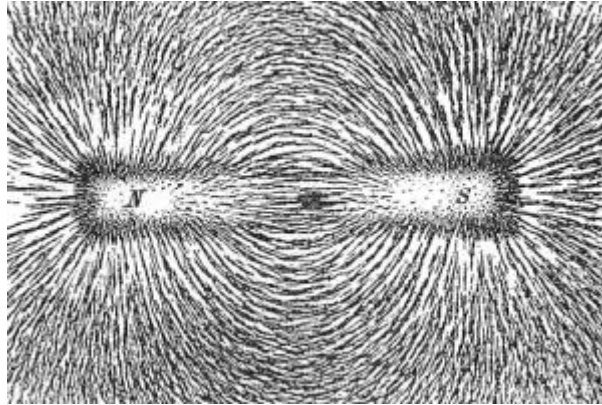


Figura 2 Líneas de fuerza y limaduras de hierro siendo afectadas por un campo magnético adyacente. Tomado de: (Castro, 2018)

Dado que Faraday y algunos otros científicos no se sentían cómodos con la acción a distancia, él prefería pensar en conceptos como el campo eléctrico en términos de una estructura o medio que guía o mueve la fuerza entre cargas, tal y como se mencionó anteriormente. (Sicard, 2008).

Dentro del contexto científico de Faraday, éste se había nutrido de diferentes posturas antinewtonianas dadas de sus contemporáneos. Por ejemplo, la unidad de todas las fuerzas desde la perspectiva dada por Boscovich, tal y como se mencionó anteriormente, que daba razón de la extensión consecuencia de las interacciones de su red. Dicha estructura metafísica inspiró al concepto de fuerza de Faraday. Así, la fuerza de Faraday y la materia son básicamente lo mismo al igual que para Boscovich lo era su red, la materia y las diferentes interacciones entre estos cuerpos. (Berkson, 1985)

Sobre la segunda década del siglo XIX Faraday escribió un breve tratado sobre la historia de los fenómenos electromagnéticos y se tomó la tarea de replicar los experimentos que se habían realizado hasta ese punto. Consecuencia de este trabajo, hizo su primer descubrimiento importante: las rotaciones electromagnéticas.

Dicho descubrimiento es importante analizarlo históricamente, teniendo en cuenta como a comienzos de ese siglo tenía ya relevancia la idea de que todas las fuerzas venían del mismo principio. Esto también recayó dentro del pensamiento de Oersted. Además, dado que era común ver alteraciones en las brújulas cuando había tormentas eléctricas, se pensó que este efecto se daba a causa de los rayos, teniendo en cuenta los experimentos realizados por Benjamín Franklin (Berkson, 1985).

Ampère, también fue importante dentro del contexto científico de Faraday, dado que fue de los primeros en enterarse del descubrimiento de Oersted. Él, más cercano a la escuela newtoniana, pensaba previo al descubrimiento de Oersted, que sólo había sentido en entender los fenómenos de tal manera en que solo podían interactuar entre sí si tenían la misma naturaleza. Por ejemplo, los fenómenos magnéticos con los magnéticos y los fenómenos eléctricos con los eléctricos. El experimento de Oersted sorprendió, pues entonces se pensaba que la corriente eléctrica era simplemente un tipo de fluido con ciertas particularidades. Con este nuevo fenómeno en mente, Ampère propuso que era mejor considerar el magnetismo como consecuencia del fluido eléctrico. No como dos cosas de diferente naturaleza. Así pensó en la realización de un experimento en donde esperaba ver atracción o repulsión entre dos cables con corriente eléctrica.

Entonces, Ampère descubrió que cuando se tienen dos cables paralelos con corrientes eléctricas en el mismo sentido, estos se atraen entre si mientras que cuando estos tienen corriente eléctrica con sentidos opuestos, estos se repelen.

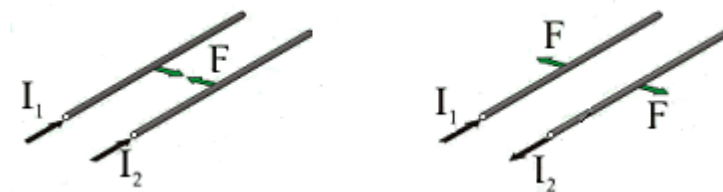


Figura 3 Cables con corriente atrayéndose o repeliéndose gracias al sentido de esta. Tomado de: (Sánchez, 2010)

Gracias a estos descubrimientos, Ampère comenzó a construir una teoría basada en los principios newtonianos teniendo en cuenta la interacción a distancia y el cuadrado de esta, por tanto, el magnetismo se vuelve consecuencia de las corrientes eléctricas y da una explicación al experimento de Oersted sin pensar en la violación del principio que él creía: que no podía haber relación entre dos naturalezas diferentes. Sin embargo, dentro de sus mismos desarrollos él ya se estaba distanciando del newtonianismo más puro, dado que solo funcionaba para corrientes cerradas y esto afectaba directamente la consistencia de la teoría misma (Berkson, 1985).

Aunque Faraday era considerado un gran admirador del trabajo de Ampère, este se dedicó a realizar una explicación alternativa al experimento de Oersted. Dicha explicación del experimento de Oersted no se planteaba a partir de una acción a distancia de manera instantánea, sino que tomaba la perspectiva de líneas de fuerza alrededor del cable y cómo estas líneas interactuaban con aquellas que genera la aguja imantada debido al magnetismo. Dicha

descripción es análoga a la realizada para las rotaciones electromagnéticas que previamente había estado utilizando (Berkson, 1985). Pero esa explicación, alternativa a la de Ampere, no servía para refutarlo, ya que la teoría de Ampere tenía un gran fundamento matemático y podía predecir los efectos magnéticos debidos a corrientes.

Otro antecedente de importancia a la hora de entender el trabajo de Faraday es la inducción magnética. Dicho trabajo desarrollado por el mismo Faraday fue posterior a la descripción del experimento de Oersted por medio de las líneas de fuerza. En tal experimentación se evidenció nuevamente la relación entre electricidad y magnetismo. Allí Faraday tras múltiples experimentos fallidos con corrientes estacionarias, notó una manifestación eléctrica inducida en un alambre cuando se iniciaba o se terminaba la corriente en otro muy cercano, con lo cual encontró que el efecto se daba al variar la intensidad del magnetismo, por tanto, es la variación del magnetismo la que permite inducir una corriente en el alambre. Así, lograba inducir a partir de la variación de flujo magnético una corriente eléctrica. Básicamente un efecto opuesto al visto en el experimento de Oersted (Figura 3).

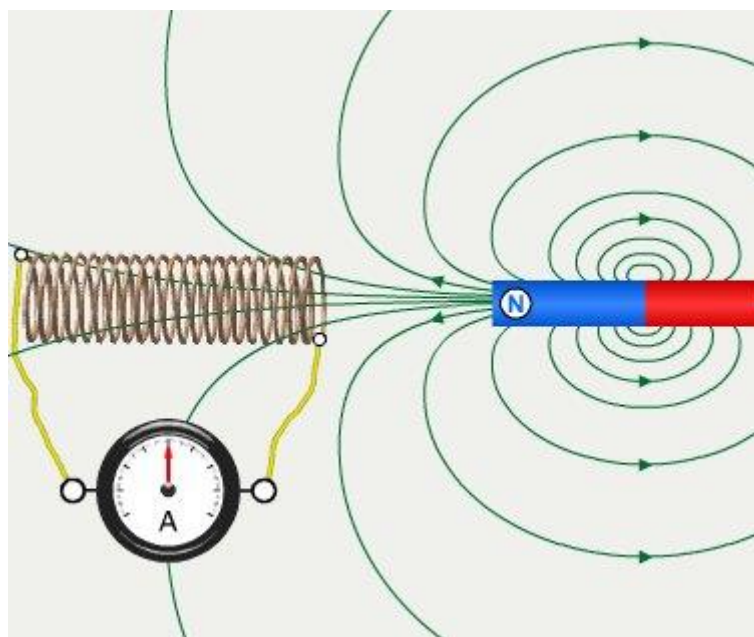


Figura 4. Inducción Magnética. Tomado de: (Zamarro, 2010)

Aunque los desarrollos experimentales y teóricos de Faraday promovieron muchas discusiones alrededor de los fenómenos eléctricos y magnéticos, como el descubrimiento de las rotaciones electromagnéticas y la inducción magnética, fue la metafísica relacionada a su manera de ver el mundo y así como con eso los fenómenos, lo que permitió cambiar el paradigma newtoniano a la concepción de campo.

Por tanto, la postura planteada por Faraday hacia la concepción de fuerza es de naturaleza sustancial. No hay diferencia entre materia y fuerza. Para que la materia exista y esta interactúe son las fuerzas actuando sobre un punto particular del espacio. Esta concepción de fuerza es en sí misma una teoría de campos pues es el mismo espacio media la interacción considerando la fuerza y las líneas que permiten visibilizar el comportamiento entre estos. Cabe resaltar que hay diferentes tipos de fuerzas y estas fuerzas actúan y se relacionan entre sí de diferentes formas. Tal y como la fuerza magnética se hace evidente cuando en un cable hay una corriente eléctrica, o como cuando el flujo magnético sobre una espira cerrada de alambre varía y este induce una corriente eléctrica. (Berkson, 1985)

La concepción de fuerza para Faraday y cómo esta se relaciona con los tipos de fuerzas, explica los experimentos posteriores que resultaron “fallidos” realizados por él. Faraday esperaba que tal y como se había encontrado una relación entre la electricidad y magnetismo, pensaba posible encontrar una entre gravitación y electricidad. Así que se pudiera inducir corriente, como los imanes, pero con fuerza gravitacional. Aunque no fue fructífero, este intento no logró inducir corriente de esa forma, fue un antecedente al relacionar las diferentes fuerzas e interacciones de la naturaleza.

Faraday y Boscovich desarrollaron cada uno de manera independiente metafísica que busca dar razón de la experiencia humana a partir de los constructos teóricos y el empirismo. Una metafísica que intenta explicar la realidad a partir de un modelo elegante y consistente usando solo un principio. Boscovich usando la red de puntos inextensos y Faraday, la fuerza desde su interpretación particular.

Para el final de su vida, Faraday, aunque preocupado por su pérdida de la memoria se esforzó en mostrar y definir con claridad lo que era una línea de fuerza. Aunque Faraday ya era reconocido como un científico, sus concepciones metafísicas carecían de fundamento matemático, aunque dichas explicaciones fueran sencillas y daba razón a experimentaciones.

Producto de las experimentaciones y buscándole dar un significado a las interacciones entre diferentes cuerpos Faraday se separó de la teoría mecanicista a distancia de Isaac Newton estructurando dentro del contexto científico las líneas de fuerza como fundamento estructural para las interacciones y fundamento de la materia en sí volviendo a considerar el medio de interacción como un ente relevante. Esta teoría, aunque termina instaurando el desarrollo de las teorías de campos que se estarán desarrollando desde el electromagnetismo en los siglos venideros.

2.2 CONCEPCIÓN MODERNA DE CAMPO.

Posterior al trabajo realizado por Faraday la electricidad y el magnetismo se consolidaron como tema central de la física dado el estudio de diferentes materiales y su relación con estos fenómenos. Además, posterior a 1903 con el modelo atómico de Thompson se descubrió que la materia tiene propiedades eléctricas; la carga. (Berkson, 1985)

Por esto mismo, la electricidad se volvió una temática rica y emocionante que tenía mucho campo de investigación y aplicación. Sin embargo, centrados en la teoría de campos desarrollada desde la metafísica relacionada a Descartes, Faraday y Boscovich. Esta tuvo su formalización dentro del contexto científico a partir del estudio de ciertos fenómenos. En primer lugar, se trataba de conseguir entonces una teoría unificada de la electricidad estática y las corrientes permanentes, y la inducción electromagnética.

James Clerk Maxwell fue el primero en abordar dichos problemas a partir de una formalización matemática considerando la teoría de campos. Sin embargo, previos a hablar de dicho desarrollo es importante entender los constructos teóricos y experimentales que lo influenciaron y permitieron la consolidación de sus ecuaciones y la relación de dichos fenómenos con la luz.

Dichos trabajos de influencia fueron fundamentalmente tres:

El primero fue el intento de describir los fenómenos electromagnéticos a partir de una descripción newtoniana a través del trabajo matemático de Weber y del desarrollo de la ley de Ohm por Kirchhoff. El segundo, fue la implementación de la conservación de la energía a todas las ramas del pensamiento físico, y, por último, el nacimiento de una nueva metafísica cartesiana y la aplicación que Thompson le dio inspirado en la mecánica de fluidos estructuró un modelo atómico basado en vórtices que estaba sustentado en la teoría del éter. (Manzanares, 2015)

Dentro del contexto del momento seguía habiendo las mismas dos posturas que se venían discutiendo desde el S. XVIII. La postura de interacción del medio y de la acción a distancia. Sin embargo, ya para la mitad del S. XIX era la teoría de campos la que iba en ascenso y la postura newtoniana la que iba de derrota en derrota. Weber y compañía desarrollaron un buen intento para relacionar las corrientes eléctricas como interacciones a distancia en el vacío. Aun así, esto fue derrumbado aún más con el descubrimiento de las ondas electromagnéticas por Hertz que confirmaban los desarrollos teóricos de Maxwell. (Berkson, 1985)

Sin embargo, la teoría electromagnética de Maxwell no lograba dar cuenta de un conjunto de fenómenos de interacción entre la radiación y la materia, como el efecto fotoeléctrico y la radiación de los cuerpos calientes. (Berkson, 1985)

En la metafísica de Maxwell y una de las razones fundamentales por las que se interesó en una teoría de campos, fue una adaptación a la Res Extensa planteada anteriormente por Descartes y que funcionaba matemáticamente bajo las leyes de Newton. Esta postura desarrollada principalmente en Cambridge bajo científicos de la talla de Lord Kelvin y Stokes fue el principio de una visión diferente de las interacciones en física, el éter. (Berkson, 1985)

La teoría del éter tomó relevancia con el desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz. Ahí la luz se ve como una onda transversal y mecánica que necesita de una sustancia o medio para desplazarse.

Dentro de la metafísica asignada a la teoría del éter la materia era consecuencia de dicha sustancia que permea absolutamente todo y las interacciones que suceden entre cuerpos visiblemente diferenciados se da a partir de dicho medio.

La teoría newtoniana de la gravedad tuvo problemas de correspondencia respecto a esta forma de interpretar cómo se propaga la luz, ya que, si esta sustancia existe, por la pérdida de energía que los planetas tendrían en el movimiento respecto a ese medio, estos irían en caída respecto al sol, por ejemplo.

Dentro del desarrollo presentado por Maxwell a partir del trabajo realizado por Faraday, él comenzó a hacer descripciones matemáticas de la metafísica de Faraday. En esto se dio cuenta de que dichos pensamientos matemáticamente tenían sentido.

Respecto a las líneas de fuerza, por ejemplo, las empezó a describir como si fueran tubos con un fluido incompresible dentro, de tal manera en que los polos de un imán funcionaban como fuentes y sumideros, y de manera análoga para la electrostática la carga positiva se consideraba una fuente y la carga negativa un sumidero. Dicho método de analogías fue recomendado hacía él por su amigo Thompson (Berkson, 1985)

Dado que es un fluido incompresible lo que está alrededor del imán, dicho fluido va disminuyendo su velocidad media conforme este se va alejando de las fuentes y sumideros. Hay que considerar que, para Maxwell, flujo era constante en cada uno de los sumideros y fuentes de la misma magnitud. De tal manera que el flujo de dicho fluido incompresible es el

mismo que sale de un polo positivo o fuente que el que entra por el sumidero o polo negativo. (Berkson, 1985)

Posterior a la descripción de la formalización matemática de los desarrollos metafísicos y experimentales de Faraday, Maxwell se propuso realizar un modelo o mecanismo análogo al éter en donde ocurran los fenómenos electromagnéticos. Ahí podría describir dichos fenómenos de tal manera en que pudiera acercarse formalmente al funcionamiento del éter, aquél fluido sobre el que todo está y todo se hace.

En las ecuaciones originales que Maxwell presenta en su trabajo denominado “On Physical Lines of Force” en 1861 presenta un conjunto de 20 ecuaciones diferenciales parciales. Dichas ecuaciones, aunque son más complejas que las que se utilizan actualmente fueron el producto de la consideración del sistema mecánico de éter, en donde los fenómenos eléctricos y los fenómenos magnéticos funcionan conjuntamente. Allí el movimiento de electrones genera cambios magnéticos transversales en el medio.

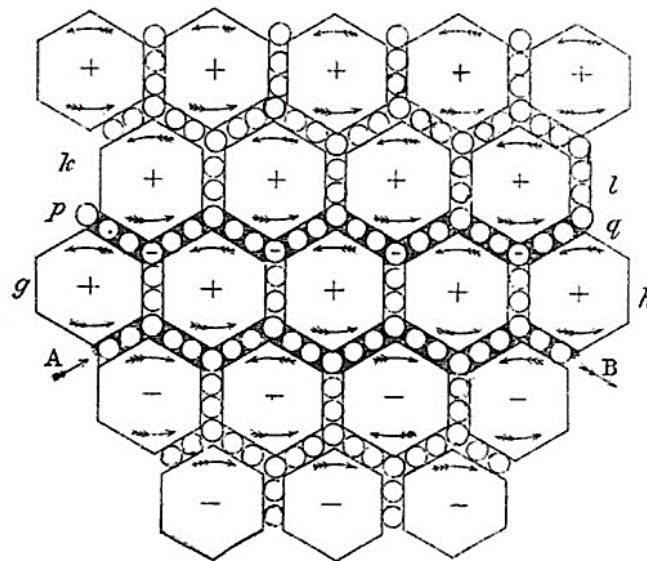


Figura 4. Modelo Mecánico de Éter. Tomado de: (Maxwell, 1861)

El modelo de éter de Maxwell supone un conjunto de vórtices magnéticos inmerso en un fluido incompresible. Cada remolino está separado de esferas eléctricas que giran en sentido opuesto a los remolinos magnéticos. La circulación de estas partículas sería el análogo a la corriente eléctrica. (Diaz., 2004)

Este modelo de éter mecánico mediador de las interacciones electromagnéticas permite la relación entre fenómenos distanciados sin considerar la interacción a distancia como

fundamento. El modelo de éter se define como un fluido permeable a todos los objetos y que relaciona todos los objetos sin hacerlos a distancia de manera instantánea. Esta definición de interacción da razón de lo que es una teoría de campos.

Sin embargo, dado de que las 20 primeras ecuaciones de Maxwell eran muy complejas fue Oliver Heaviside y Heinrich Hertz quienes trabajando sobre ellas lograron hacer una simplificación y reducción a cuatro ecuaciones fundamentales sobre las cuales hoy día son conocidas como las 4 ecuaciones de Maxwell que se presentarán más adelante. Dicho nombre fue para reconocer su esfuerzo en dicha labor, sin embargo, tal y como puede verse en los nombres de cada ley y en el avance histórico aquí presentado fue gracias a muchos científicos que estas ecuaciones llegaron a describirse.

En resumen, la concepción de campo de Maxwell está relacionada a la interacción electromagnética a partir de un medio denominado éter que se define a partir de un mecanismo que junta los fenómenos eléctricos y magnéticos. Dicha definición de fluido incompresible está expuesta en las ecuaciones presentadas a continuación ya que, incluso en el manejo actual de dichas ecuaciones en términos de divergencias y rotacionales de campo son fácilmente expresables a partir del comportamiento de fluidos. Fuentes, sumideros y vórtices, conceptos sobre los cuales Maxwell desarrolló su teoría.

Las ecuaciones presentadas a continuación son la culminación del trabajo de consolidación, cabe resaltar que dichas ecuaciones se pueden encontrar tanto de modo diferencial, como integral.

Tabla 1: Ecuaciones de Maxwell consolidadas.

La ley de Gauss para el campo eléctrico.	La ley de Gauss para el campo magnético	La ley de Faraday de inducción electromagnética.	La ley de Ampère - Maxwell.
Forma integral: $\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0}$	Forma Integral: $\oint B \cdot dA = 0$	Forma Integral: $\oint E \cdot dl = -\frac{d\phi}{dt}$	Forma Integral: $\oint B \cdot dl = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$
Forma Diferencial:	Forma Diferencial:	Forma diferencial:	Forma Diferencial:

$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ <p>Dicha ecuación define el campo eléctrico sobre una superficie cerrada; es simplemente igual a la razón entre la carga eléctrica encerrada allí y la permitividad eléctrica del vacío.</p>	$\nabla \cdot B = 0$ <p>Dicha ecuación define al campo eléctrico como el flujo nulo de líneas de campo magnético sobre sí mismo. Dicho de otro modo, que la magnitud de líneas de campo que salen de un imán de un polo, son las mismas que entran.</p> <p>Consecuencia de esto no se puede encontrar en la naturaleza monopolos magnéticos.</p>	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ <p>Esta ecuación define la relación hablada anteriormente encontrada por Faraday al variar el flujo magnético sobre una superficie y como esto genera campos eléctricos sobre una espira. El principio para hablar de generadores eléctricos de corriente inducida a partir de variaciones de flujo sobre un área de un circuito cerrado.</p>	$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ <p>La ley de Ampère - Maxwell da razón de como la densidad de corriente y la variación de campo eléctrico en el tiempo produce campos magnéticos alrededor de un circuito cerrado.</p>
---	--	--	---

Las ecuaciones presentadas anteriormente están dadas de tal manera que ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío, μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, E es el campo eléctrico, B el campo magnético, ρ es la densidad de carga eléctrica, J es la densidad de corriente eléctrica, Q es la carga eléctrica, ϕ es el flujo magnético, I es la corriente eléctrica, t es el tiempo y ∇ que es un vector que da razón de la tasa máxima de cambio. Dependiendo de si está con un producto escalar o vectorial se define como un rotacional o divergencia.

Este consolidado matemático producto del trabajo de Maxwell, Ampere, Faraday, etcétera. Se fundamentan bajo de una concepción de éter en donde los fenómenos electromagnéticos son dados gracias a que se tiene en cuenta el espacio en medio de las interacciones. Gracias a esto, ahora la teoría electromagnética logra predecir acertadamente un gran número de fenómenos

relacionados a este, fundamentados en una teoría estructurada tanto desde lo metafísico a lo matemático desde una teoría de campos.

Como consecuencia de las ecuaciones de Maxwell presentadas anteriormente y en la pregunta sobre cómo interactúan, en aquel medio denominado éter, los fenómenos electromagnéticos se puede llegar a relacionar ahora a la electricidad y el magnetismo otro fenómeno; la luz.

Este es así ya que:

Tomando la tercera ecuación de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Luego tomando la rotación de ambos lados de la misma ecuación:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)$$

Después, tomando la identidad vectorial $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ se tiene que:

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)$$

Luego, usando la primera ecuación de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Y reemplazando:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \left(\frac{1}{\epsilon_0} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) = -\nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)$$

Luego, utilizando la cuarta ecuación de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Y reemplazando nuevamente:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \left(\frac{1}{\epsilon_0}\right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) = \frac{\mu_0 \mathbf{J}}{\epsilon_0} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

Finalmente, simplificando:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \left(\frac{1}{c^2}\right) \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mathbf{0}$$

Allí, la constante c , equivalente a la velocidad de la luz, se define a partir de:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Como se ve en la deducción presentada anteriormente, desde las ecuaciones de Maxwell se puede definir la ecuación de onda en donde la velocidad de aquella equivale a la de la luz.

Entendiendo una onda, dicha puede tener consigo diferente frecuencia o longitud de onda que puede dar razón de los diferentes tipos de luz que se conocen actualmente, como lo son las ondas de radio, la radiación gamma o la luz visible.

Sabiendo que en el contexto científico de Maxwell la luz estaba fundamentada como un fenómeno ondulatorio gracias a Thomas Young por el experimento de la doble rendija y al fenómeno de interferencia, y las consideraciones hechas sobre la consolidación de las ecuaciones de Maxwell sobre el éter se empezó a considerar a la luz como aquella que permite la interacción de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Este fenómeno entonces sería una onda mecánica, tal y como el sonido, que se mueve a partir del éter, este es el papel que tomaría entonces en la teoría de campos. Siendo el éter el campo correspondiente sobre el que suceden las interacciones electromagnéticas, siendo la luz, el ente de interacción.

La relación de los fenómenos eléctricos y magnéticos con la luz la estructura Franck Hertz al oscilar un circuito eléctrico generando ondas de luz.

Tal y como puede verse la concepción de campo desde el contexto científico de la época entra en formalización con el trabajo de Oersted, Faraday, Ampère, Hertz, Heaviside, Maxwell, etc. La metafísica relacionada dada desde Descartes, Bosovich y Faraday viene a tomar formalización matemática con la concepción de campo establecida por Maxwell. Los fenómenos eléctricos y magnéticos toman también una relación con la luz al definirse en este contexto como una onda electromagnética.

Dicha onda electromagnética, tal y como cualquier onda transversal y mecánica ocupa de un medio material que en este caso se define como éter. Dicho éter cuenta con todas las propiedades que había definido Descartes en su momento y va de la mano con la perspectiva de Faraday al ser la fuente de la materia normal y razón por la que suceden todas las interacciones.

La descripción del campo electromagnético es una contundente consolidación que permite predecir con fuerza esos fenómenos considerando el medio de interacción. Dicho desarrollo formaliza matemáticamente la discusión respecto a la interacción de diferentes cuerpos y la relación de los diferentes fenómenos. Los fenómenos ondulatorios de la luz se enlazan con la descripción desde la electricidad y el magnetismo para formalizar una teoría de campos consistente tanto desde lo experimental, como desde lo teórico.

Sin embargo, la perspectiva de éter tuvo un gran traspié producto del trabajo de Michelson y Morley en 1887. Este experimento consistía en un interferómetro que buscaba medir las velocidades relativas de la luz teniendo en cuenta el movimiento de la tierra en el éter que se mantenía constante. El resultado, según el análisis previo al experimento, debería dar datos diferentes en una u otra dirección y poder medir el movimiento absoluto de la tierra.

En este experimento se enviaba un espectro de luz monocromática hacia un divisor de haz a 45° que permitía el paso del 50% de la luz. Esta era enviada hacia dos espejos, en este caso serían los espejos 1 y 2 de la figura 5 mostrada a continuación. Estos reenviaban la luz hacia el espejo que redirigía ambos rayos hacia un detector de patrones de interferencia. Según los científicos este experimento pasado el tiempo, dado el movimiento de la tierra, generaría diferentes patrones dados los cambios en el movimiento terrestre. Sin embargo, los resultados del experimento no eran los esperados, ya que siempre se mostraba el mismo patrón, independientemente del año en que se hiciera la experimentación. Esto solamente da una conclusión aparente. Que la tierra no se mueve, cosa que para el momento no era discutible, o que la luz se mueve en todas las direcciones a la misma velocidad independientemente del movimiento relativo que se considere.

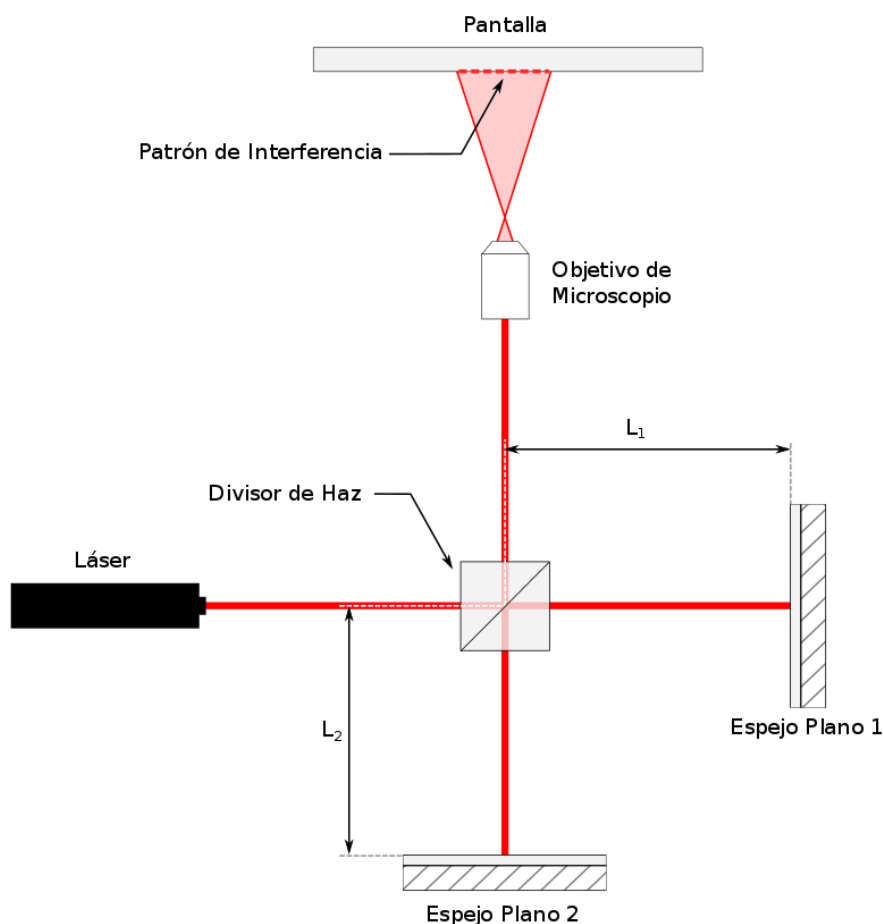


Figura 5. Inducción Magnética. Tomado de: (Serra, 2015)

Este experimento fue fundamental en la concepción científica de la naturaleza de las ondas electromagnéticas ya que refutaba la existencia del éter como sustancia que permea y es estática en el universo y, el hecho de pensar la luz, las ondas electromagnéticas como ondas mecánicas.

Dichas ondas ya no necesitan de un medio mecánico como el sonido, sino que se estructuran como oscilaciones perpendiculares del campo eléctrico y magnético que, aunque no tenga propiedades de fluido sí que dan razón de las interacciones eléctricas, magnéticas y ópticas.

Producto de la interpretación de dicho experimento el entendimiento de las ondas electromagnéticas cambia. Hasta este entonces dichas ondas eran de tipo material y transversal. Esto significa que estas necesitaban un medio físico para que se transfirieran en el espacio. Sin embargo, dado que dicho éter estático no puede existir se concluyó que dichas ondas son diferentes a las del sonido, por ejemplo. La luz ahora está compuesta de dos campos que se superponen; el campo eléctrico y el campo magnético. Cuando una partícula con carga se acelera o vibra esta genera campos magnéticos que a su vez generan campos eléctricos de

manera consecuente. Gracias a esto se puede explicar cómo estas se continúan desplazando en el espacio vacío sin necesidad de un ente material que las sostenga.

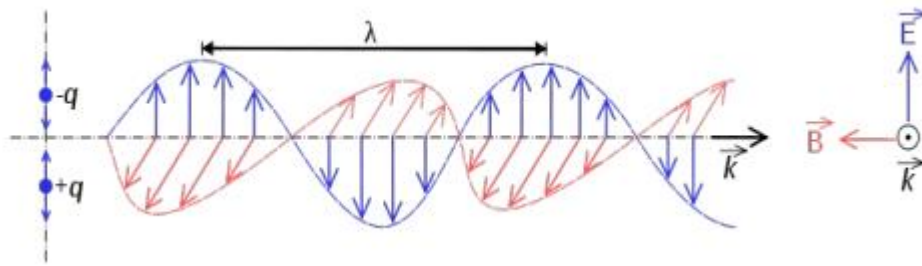


Figura 6. Onda electromagnética monocromática. Tomado de: (Monsalvo., 2009)

En la Figura 6 se puede apreciar como una carga q oscila y genera campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Siendo \vec{E} el campo eléctrico y \vec{B} el campo magnético.

2.3 RELACIÓN SOBRE LA CONCEPCIÓN DE CAMPO ENTRE LA ELECTRODINÁMICA Y LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN.

Producto del experimento de Michelson y Morley y como este contradecía las concepciones de éter de la época y el medio de interacción por el cual los fenómenos electromagnéticos son dados. La postulación de la velocidad de la luz (c) como una constante que surge de dicha experimentación, generó un cúmulo de preguntas alrededor de la consistencia de la teoría mecánica y la teoría electromagnética.

Considerar la luz como una constante contradice el estudio del movimiento considerando velocidades relativas para observadores diferentes.

Las ecuaciones usadas hasta entonces, relacionadas a las velocidades relativas, no impedían que algo se moviera con una velocidad mayor que la velocidad de la luz. Estas ecuaciones que daban razón al movimiento considerando las transformaciones de un observador inercial a otro, vienen dadas por Galileo Galilei. Desde la perspectiva de Galileo, si un tren se mueve a la velocidad de la luz y alguien dentro de este camina en la misma dirección del movimiento del tren, entonces este personaje, visto por un observador que se encuentre por ejemplo en una estación, fuera del tren, consecuencia de los marcos de referencia caminará a la velocidad del tren, que en este caso sería c más la velocidad propia, a fin de cuentas, lo cual deja como resultado una velocidad relativa mayor que la velocidad de la luz.

Dicho análisis contradecía lo encontrado en el experimento de Michelsen y Morley tal y como se mencionó anteriormente, ya que experimentalmente se veía que independientemente del movimiento del planeta la luz se movía a la misma velocidad en ambas direcciones.

Sobre finales del S. XIX y comienzos del S. XX, Hendrik Lorentz, plantea ecuaciones de transformación para sistemas inerciales teniendo como máximo la velocidad de la luz. Esto en un intento de reconciliar la teoría clásica con el electromagnetismo fundamentado en el éter.

El cambio a las ecuaciones de transformación es el siguiente siendo las transformaciones de movimiento desde el sistema S, al sistema S'. Cabe resaltar que estas ecuaciones dan razón solo de cambios de movimiento respecto al eje x, de cambiar esto a más ejes, las ecuaciones vendrían dadas en notación vectorial.

Ecuaciones de transformación de Galileo:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Ecuaciones de transformación de Lorentz.

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

Siendo γ el factor de Lorentz que se define como:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Posterior a esto, Albert Einstein, fundamentándose en los resultados experimentales y en las ecuaciones de transformación de Lorentz plantea la Teoría de la Relatividad Especial considerando los siguientes postulados:

1. Las leyes físicas son las mismas independientemente del sistema de referencia.
2. La constancia de la velocidad de la luz para todos los observadores.

Considerando esto, Einstein cambió las concepciones estructurales de la teoría mecánica del movimiento y la luz; el espacio y el tiempo, dado que, tal y como se había presentado desde el inicio del presente trabajo, ya no estamos con un espacio y tiempo absolutos que no son afectados al analizarse los fenómenos, sino que es dinámico y varía considerando el movimiento a altas velocidades.

Al introducir las ecuaciones de Maxwell dentro de las transformaciones de Lorentz para diferentes marcos de referencia se puede ver que estas son invariantes. Lo que quiere decir que el comportamiento de la luz, de los campos eléctricos y magnéticos, son los mismos independientemente del marco de referencia.

El hecho de que sean invariantes para todos los sistemas de referencia tomando de tope la velocidad de la luz y que tuvieran esa consistencia que no tenían con las ecuaciones de transformación galileanas fue un motivante importante para Einstein en su formulación de una teoría consistente entre los fenómenos electromagnéticos y los marcos de referencia.

Bajo el desarrollo matemático realizado en la Teoría de la Relatividad Especial, la formalización se realiza a partir de notación tensorial.

Ley de Gauss para el campo eléctrico:

$$\partial_i E_i = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

En dicha ecuación E_i representa el campo eléctrico, ρ la densidad de carga eléctrica y ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío.

Ley de Faraday para el campo magnético:

$$\partial B^i + \epsilon_{jk}^i \partial_j E_k = 0$$

En dicha ecuación B^i es el campo magnético, E_k es el campo eléctrico y ϵ_{jk}^i es el tensor de Levi- Civita.

Dichas ecuaciones descritas en notación tensorial describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos oscilantes en el vacío.

Aunque el experimento de Michelsen y Morley al descartar la existencia del éter generó un cambio sustancial al entendimiento de la luz, las ecuaciones de Maxwell no sufrieron una modificación sobre la estructura sobre la fue formulada, sino que se adaptó la interpretación de este fenómeno como la oscilación continua de los campos eléctricos y magnéticos que se inducen continuamente en el vacío sin la necesidad de un medio.

La Teoría Especial de la Relatividad hizo uso del concepto de la luz tomando de base las observaciones del experimento de Michelsen y Morley para postular la velocidad de las ondas electromagnéticas como una constante independientemente del observador. Esto se vio corroborado en la invarianza de las ecuaciones de Maxwell en las transformaciones de Lorentz. Es decir, los fenómenos electromagnéticos descritos por la teoría de Maxwell, independientemente de su notación, son válidas para cualquier sistema de referencia.

2.4 PROBLEMAS QUE LLEVARON AL DESARROLLO DE LA MECANICA CUANTICA Y SU RELACION CON LA ELECTRODINÁMICA.

Como antecedente importante a la formulación de la electrodinámica cuántica hubo varios fenómenos físicos que la teoría clásica electromagnética no era capaz de describir con precisión. Entre ellos está la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

La explicación de dichos fenómenos cambió radicalmente la concepción que se tenía en ese momento de la naturaleza de la luz, vista como una onda electromagnética de naturaleza continua.

Para explicarlo a más profundidad, se describirá brevemente cada fenómeno y así concluyó en la cuantización de la luz en paquetes, o, de otra manera, como fotones o partículas de luz, interactúan con la materia.

Sobre finales del S. XIX uno de los grandes problemas de discusión era el espectro de emisión de luz dado por un cuerpo caliente. La gran problemática yacía en la imposibilidad de explicar dicha distribución a partir de los conocimientos que se tenían sobre la luz y su comportamiento con la materia. Sin embargo, hubo varios intentos que describían matemáticamente el comportamiento, pero solo bajo ciertas frecuencias.

Uno de los intentos fue el realizado por Wilhelm Wien en 1893 en donde lograba describir adecuadamente las altas frecuencias de dicho espectro de radiación, aun así, no lograba describir el comportamiento en bajas frecuencias.

La ley de Wien es la siguiente:

$$\lambda_{max}T = b$$

En la ecuación λ_{max} representa la longitud de onda en la cual alcanza su máximo de intensidad. b es la constante de Wien que tiene un valor aproximado de $2.898 \times 10^{-3}mK$ y T es la temperatura absoluta del cuerpo medido en Kelvin.

Esta ley permite relacionar una constante experimental a la longitud de onda de la luz y la temperatura del cuerpo en emisión.

Posterior a esto, Rayleigh Jeans y Sir James Jeans postularon la Ley de Rayleigh- Jeans. Aquí dan razón del espectro de emisión con la temperatura de dicho cuerpo. Esta ley, a comparación de la presentada por Wien años antes da razón del espectro de emisión a bajas frecuencias sin poder describir adecuadamente el comportamiento a altas frecuencias, sobre el espectro ultravioleta. Dicho quiebre sobre esa postura se denominó la catástrofe ultravioleta dado que la energía que teóricamente predecía iría hacia el infinito, cosa que experimentalmente no sucedía.

La ley de Rayleigh Jeans se plantea matemáticamente de la siguiente forma:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}$$

Allí B_{λ} es la densidad espectral de energía y depende de la temperatura del cuerpo, la longitud de onda y la constante de Boltzmann k_B y c , que es la velocidad de la luz.

Para solucionar el problema encontrado relacionado al modelo matemático que pudiese predecir el adecuado comportamiento de la radiación de cuerpo negro, Max Planck, desarrolló su modelo de tal manera en que se considerara el intercambio de energía entre la radiación y la materia de la luz como paquetes de un valor igual o múltiplo entero de un valor mínimo. En vez de considerar la interacción entre la radiación y la materia como un intercambio continuo, este se absorbía o emitía en paquetes.

La abstracción respecto a la naturaleza de la luz se complicará de cierta forma, dado que en una misma ecuación damos razón de una cantidad discreta de energía absorbida o emitida basada en una onda continua, y que depende específicamente de la frecuencia de esta.

$$E = h\nu$$

En dicha ecuación E , es la energía del fotón o partícula de luz, h es la constante de Planck que equivale a $6.6226 \times 10^{-34} Js$ y ν es la frecuencia asociada a dicho fotón.

Gracias a este ajuste y a las consideraciones físicas de dicho fenómeno se logró hacer una predicción correcta de la radiación de cuerpo negro eliminando la catástrofe ultravioleta.

Dentro de la perspectiva de campos el fotón, o partícula de la luz, es la unidad fundamental de radiación electromagnética que interactúa con la materia, en este caso el cuerpo caliente. Hasta entonces la luz era una onda transversal que tiene la característica de ser un ente continuo, en cuántica es una partícula que depende de particularidades ondulatorias definidas por la concepción del campo eléctrico y magnético.

Otro fenómeno importante al comprender la naturaleza discontinua de la luz y como también tiene otras cualidades de interacción con la materia, se ve en el análisis del efecto fotoeléctrico.

En 1887, Heinrich Hertz, descubrió que podían liberarse electrones de una superficie metálica a la cual se le irradiaban ondas electromagnéticas. Estos electrones estaban atraídos por un campo eléctrico y generaban una corriente eléctrica. Dicho fenómeno se llamó efecto fotoeléctrico.

En 1905, Albert Einstein plantea una explicación a dicho fenómeno en su artículo denominado “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de luz”. En dicho artículo plantea como paquetes discretos de luz interactúan con los electrones de dicho material y de esta forma se transfiere su energía permitiéndoles desprenderse de la placa metálica y cerrar el circuito. En dicho artículo se plantea que la energía de aquellos paquetes depende de la frecuencia de la luz y no de su intensidad, por tanto, Einstein extiende la forma en que Planck propone la interacción entre la luz y la materia a otros fenómenos y establece una condición general para cualquier tipo de luz: que su energía está cuantizada y que depende de su frecuencia, no de su intensidad como en las ondas mecánicas como el sonido.

Por último, se tiene el efecto Compton, que fue descrito por Arthur Compton en 1922. En la explicación dada por Compton, este propone que se encuentra un electrón en reposo y se le irradia con radiación altamente energética, dada por su frecuencia ($> 10^{16} Hz$).

La dispersión del efecto Compton se identifica teniendo en cuenta los cambios de longitud de onda del fotón dispersado. Dicho cambio en la longitud de onda se ve representado en la fórmula de Compton:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

En donde $\Delta\lambda$ es el cambio de la longitud de onda del fotón. λ' es la longitud de onda del fotón dispersado, λ es la longitud de onda del fotón incidente, h es la constante de Planck, m_e es la masa del electrón c es la velocidad de la luz y θ es el ángulo de dispersión del fotón.

Previo al experimento se consideraba a la luz como un continuo de radiación electromagnética. Cuando la luz incide sobre el electrón el cambio de la longitud de onda del fotón dispersado muestra el comportamiento corpuscular de la luz, que tiene energía y momento lineal, ya que se transmite al electrón y se ve al analizar los resultados finales del experimento. Dado que el fotón pierde energía en la colisión se mantiene la ley de conservación de la energía y dado que la diferencia es transmitida al electrón.

El experimento de dispersión de Compton soporta la naturaleza dual de la luz, tanto como partícula como onda experimentalmente al considerar la cuantización de la radiación electromagnética para explicar el fenómeno fundamentándose también en la ley de conservación de la energía. Dentro de la perspectiva de campo electromagnético, dicho fotón es una perturbación del campo electromagnético de manera discreta en un punto particular del espacio que permite el entendimiento e interacción de dicho campo con la materia.

Sobre comienzos del S. XX, Louis de Broglie, planteó la hipótesis de que tal y como la luz, la materia como los electrones, podían tener un comportamiento dual, ondulatorio y corpuscular. Según su hipótesis, a cada partícula material se le puede asociar una longitud de onda. Esta longitud de onda está asociada al momento lineal de la partícula a partir de la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

En donde λ es la longitud de onda de dicha partícula material, h es la constante de Planck y p es el momento lineal de la partícula.

Dicha hipótesis fue confirmada por Clinton Davinsson y Lester Gerner en 1927 al observar efectos de difracción al pasar electrones por una fina capa de cristal de Níquel.

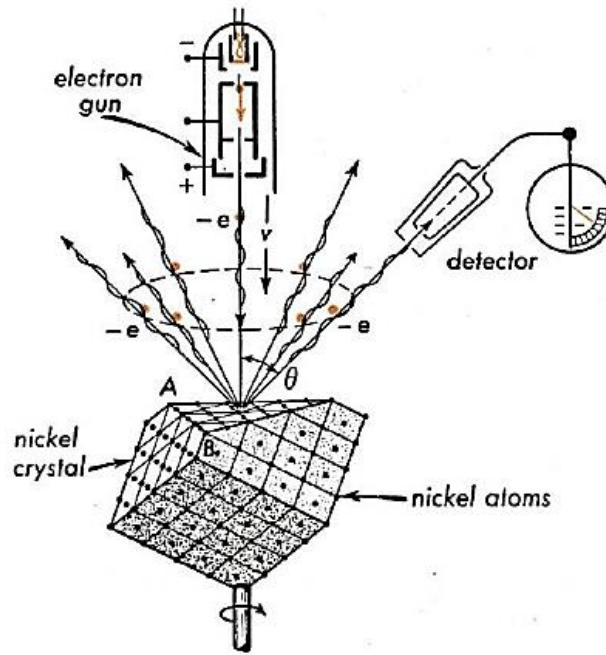


Figura 7. Experimento de Difracción de Electrones. Tomado de: (Suzuki, 2013)

En el experimento, los electrones se lanzan hacia la superficie de cristales de níquel y se difractan en diferentes ángulos como si fueran ondas de muy baja longitud de onda. (Suzuki, 2013)

Consecuencia de este experimento, ahora no solo la luz se puede representar teniendo en cuenta un comportamiento dual, sino también la materia.

Otro suceso que fue importante en el desarrollo del entendimiento de la composición de la materia fue el modelo atómico que se basaba en la teoría cuántica emergente de Niels Bohr sobre la primera y segunda década del S. XX.

Según este modelo los electrones en el átomo solo pueden tomar ciertas orbitas discretas alrededor del núcleo atómico y solo pueden absorber o emitir cantidades discretas de radiación electromagnética, cuando pasan de orbitas con menor energía a otras con mayor energía o viceversa. Gracias a este modelo, se amplió el entendimiento de la estructura fundamental de la materia ya que, gracias a este modelo de orbitas discretas y en consideración de la luz como partícula fue posible describir las líneas del espectro de emisión de la luz emitido por los átomos. Esta consistencia de la teoría cuántica con la estructura de la materia brindó más fundamento y peso a la cuantización de la luz.

El desarrollo de la teoría cuántica sobre la interacción de la luz con la materia abrió la discusión sobre si esta tenía también un comportamiento corpuscular. Dicho desarrollo fundamentó el

cómo se considera la luz como un comportamiento dual. Dentro de la perspectiva de Campos, la luz seguía viéndose como la perturbación continua del campo electromagnético y dichas partículas de luz se definían a partir de paquetes discontinuos de dicha onda que al interactuar con materia se les asocia características corpusculares que permiten la correcta predicción de fenómenos que no podrían ser descritos de considerar la luz como un ente no discreto.

2.5 CONCEPCIÓN DE CAMPO EN MECÁNICA CUÁNTICA.

Tal y como se ha visto en la formulación de la física hasta el contexto científico de inicios del S. XX, hay varias teorías relacionadas a los fenómenos electromagnéticos que son importantes considerarlos para generar una correcta predicción de estos, a saber; la teoría electromagnética, la relatividad especial de Einstein y la teoría cuántica. En los dos primeros, aquellos fenómenos están definidos a partir de ondas continuas y en la teoría cuántica se ve una relación entre ondas electromagnéticas y paquetes de energía para predecir y describir adecuadamente la radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

Sobre los avances más importantes para el desarrollo de la electrodinámica cuántica se encuentra Niels Bohr, que 5 años posteriores a la formulación y planteamiento de su modelo atómico, postuló una relación de este con la teoría electromagnética centrada en el concepto de campo. Allí Bohr expuso que los electrones adyacentes al núcleo atómico no solo estaban atraídos electrostáticamente hacia este, sino que eran afectados por un campo de radiación que se generaba cuando los electrones absorbían o emitían fotones, allí se puso de presente que dicho campo funcionaba a modo de medio de interacción entre estos. (Weinberger, 2014)

Sobre la segunda década del S. XX, Erwin Schrödinger propone la ecuación de onda para la predicción del comportamiento de los electrones, dado que, tanto estos como la luz pueden ser expresados a partir de ondas después de ser corroborada la hipótesis de Broglie.

Dicha ecuación para la descripción de partículas cuánticas libres a partir de su comportamiento ondulatorio en una dimensión se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \left(\frac{2m}{\hbar} \right) (E - V) \psi = 0$$

En donde ψ es la función de onda de la partícula, $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$ es la segunda derivada parcial de la función de onda respecto a la posición x , m es la masa de la partícula, \hbar es la constante reducida de Planck, E es la energía total de la partícula y V es el potencial de la partícula que depende de la posición x .

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Dicha descripción de la ecuación de onda se da bajo el entendimiento cuántico de las partículas sin tener en cuenta efectos relativistas. Sin embargo, para la correcta predicción de los electrones se tenía que considerar que pasaba con estos cuando alcanzaban una alta velocidad, una cercana a c . Para realizar esto, se debía hacer una unificación de la Teoría Cuántica junto a la Teoría de la Relatividad Especial de Einstein.

Comenzando la tercera década del S. XX, Paul Dirac desarrolla una ecuación cuántica relativista que yace a partir de la ecuación de onda de Schrödinger. Dicha ecuación permite una adecuada descripción del comportamiento cuántico de los electrones considerando sus implicaciones relativistas.

Esta ecuación permite soluciones negativas en un espacio dado, lo que implicaría la existencia de partículas de las mismas características de un electrón, pero de carga opuesta.

Se define la ecuación de Dirac a continuación.

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\psi = 0$$

En donde ψ es la función de onda teniendo en cuenta las cuatro componentes dadas desde la Teoría de la Relatividad Espacial, es decir tres espaciales y una temporal, m es la masa del electrón, γ^μ son las matrices de Dirac y ∂_μ es la derivada parcial covariante.

Sobre el año 1932, Carl Anderson, a partir del análisis de partículas cuánticas haciendo uso de una cámara de niebla se dio cuenta de comportamientos extraños en las trayectorias de partículas cargadas. Se dio cuenta de que una partícula se movía en la dirección opuesta a la de los electrones. Esto fue inesperado, dado que contaba con la misma masa de los electrones, pero diferente carga. Por esto, dichas partículas fueron denominadas positrones.

En 1934, Paul Dirac estaba intentando explicar la aparición y desaparición de pares de electrones y positrones vistos de manera experimental y predichos desde su propia ecuación. El análisis fue a partir de una concepción llamada mar de Dirac. El mar de Dirac entra dentro del contexto de la teoría de campos dado que tiene una gran similitud con la teoría del éter del planteada por Ampere y Maxwell en el S XIX. (Tombe, 2022)

Dicho mar de Dirac es un concepto utilizado para describir diferentes partículas cuánticas denominadas fermiones y anti-fermiones, como los electrones y positrones. Dichas partículas cuánticas están definidas a partir de su spin sementero. La concepción de mar de Dirac define la creación de pares de partículas, a partir de energía de diferentes campos que se distribuyen en el espacio. (Finster, 2009)

Dicho desarrollo sobre los fenómenos cuánticos y relativistas, fundamentada sobre la teoría de campos permite una adecuada descripción de los electrones desde una perspectiva ondulatoria. Bajo el análisis de dicha teoría se puede ver como la existencia de la materia está dada a partir del comportamiento de diferentes campos. Esto se puede ver en la creación y aniquilación de pares de partículas, como electrones y positrones.

Aquella perspectiva que define la materia y sus interacciones a partir de campos, fluidos o principios fundamentalistas son similares a los desarrollados desde comienzos del S. XVIII con la teoría atomista de Boscovich y que terminaron siendo inspiración y base para el desarrollo de la teoría electromagnética de campos.

CAPÍTULO III. PROPUESTA DE CONTEXTUALIZACIÓN DEL CONCEPTO DE CAMPO PARA LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA.

En el S. XX, Jean Piaget desarrolla su teoría del pensamiento constructivista. Dicha teoría revolucionó la comprensión y el desarrollo cognitivo que tienen los niños. La teoría plantea que no solo adquieren conocimiento de manera pasiva, sino que, a partir de preconcepciones, van construyéndolo poco a poco, usando nuevas experiencias con su entorno, de la experiencia.

Si bien dicha teoría se basa en cómo los niños en diferentes etapas de desarrollo van construyendo conocimiento también es aplicable a estudiantes universitarios ya que proporciona una valiosa perspectiva con la que se puede entender como una persona adquiere conocimiento.

Como se mencionó antes, la teoría constructivista explica que los estudiantes estructuran conocimiento usando diferentes experiencias. La teoría plantea estructuras metacognitivas que se asimilan y acomodan en el proceso de aprendizaje. (Dongo, 2008)

En el proceso de aprendizaje, buscando la adaptación de nueva información dentro de aquellas estructuras metacognitivas, el estudiante a partir de un proceso de equilibración intenta encontrar un balance dentro de las experiencias adquiridas y los constructos que ya están dentro de su mente. Jean Piaget describió dichos constructos mentales como esquemas, tal y como las define Gerard Vergnaud en la Teoría de Campos Conceptuales más adelante.

Sobre la década de 1980, Gerard Vergnaud, postula la Teoría de Campos Conceptuales buscando definir un método para estructurar esquemas cognitivos en matemáticas basándose en la teoría del pensamiento constructivista.

Gerard Vergnaud establece la importancia de la conceptualización y de cómo se estructura una esquematización correspondiente a este. Según su teoría, un concepto adquiere sentido para una persona cuando este es abordado desde muchas situaciones que le brindan contraste y contexto.

Dichas situaciones él las difiere en dos:

1. Aquellas que el sujeto dispone de competencias para permitirle abordarlas de buena manera.
2. Aquellas en las que el sujeto no cuenta con las habilidades necesarias.

En la primera situación las conductas están automatizadas y el sujeto las resuelve automáticamente gracias a la esquematización previa realizada sobre ella. Sin embargo, sobre la segunda situación el sujeto se verá forzado a la reflexión, la exploración, la tentativa, etcétera.

En conclusión, los conocimientos, según Gerard Vergnaud, adquieren generalidad a la hora de que los elementos que los componen son aprehensibles por los sujetos al margen de referencias a situaciones particulares. Esto indica que deben estar relacionados a una red de conceptos que el sujeto ha aprendido a partir de un proceso de reflexión sobre los conceptos. (Barrantes, 2006)

Si bien el presente texto no está enfocado en la resolución de problemas prácticos en la experiencia, la Teoría de Campos Conceptuales es pertinente a la hora de relacionar conceptos abstractos en una red comprensible para el sujeto que está aprendiendo. La generación de esquemas está también dada en la interpretación y aprehensión de temáticas abstractas.

Dentro de la teoría de marcos conceptuales una definición fundamental de su teoría son los esquemas. El concepto de esquema, para Vergnaud, se refiere a la organización invariante de la conducta para cierta clase de situaciones en la experiencia o abstracción. En los esquemas en los que se debe investigar los elementos cognitivos que permiten la acción mecánica del sujeto se les denomina operatoria. Estos esquemas se presentan en todos los dominios, como en el campo de las matemáticas. Dichos esquemas podrían ser ineficaces dada una mala estructuración. En ese caso es necesaria una modificación de este. En este sentido, tal y como se mencionaba anteriormente, dicha teoría coincide con Piaget, dado que se acomoda al esquema considerando las necesidades del sujeto. Dicha adaptación depende del cambio de las estructuras cognitivas: asimilación y acomodación. (Barrantes, 2006)

Según (Barrantes, 2006) “La teoría de campos conceptuales ha servido de marco referencial teórico para muchas investigaciones que pretenden comprender y explicar el proceso de aprendizaje de conceptos en Matemáticas y en Física. Por ejemplo, Casallas, Gómez y Buitrago, lo utilizan en torno a las prácticas evaluativas en la educación secundaria relativos al concepto de función lineal dentro del campo conceptual multiplicativo; De León y Fuenlabrada, analizan los procedimientos que utilizan los niños de primaria para resolver situaciones problemáticas que comprometen el significado de cociente de las fracciones desde los enfoques de la psicología genética y la teoría de los campos conceptuales; Llancaqueo, Caballero y Moreira usan el marco de la teoría de campos conceptuales de Vergnaud, como

referencial teórico para comprender y explicar el proceso de aprendizaje del concepto de campo en la Física.”

Según Vergnaud, existen diferentes etapas en la adquisición de conceptos. Uno de ellos es la formalización. En esta etapa los estudiantes adquieren un nivel mucho más estructurado y profundo de las concepciones más fundamentales previamente enseñadas. Para usar este nivel es necesario una base metacognitiva sustancial para las construcciones más especializadas de un contenido particular.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Este documento busca la formalización de conceptos a partir de considerar las temáticas previas que estudiantes de física tienen adquiridas dentro de esquemas propios para mitad o finales del currículo académico. En ese sentido, las relaciones planteadas aquí, que abordan temario asimilado permiten la acomodación de esquemas relacionados a dichas temáticas para la formalización y especialización del concepto que se busca enseñar. En este caso, el concepto de campo y su relevancia para la mecánica cuántica.

La apropiación de este concepto es fundamental para el entendimiento de la fenomenología de diferentes ramas de la física, como lo es la electrodinámica, la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Dado que, es un concepto que está de base y soporta la existencia y relación de diferentes cuerpos.

Entendiendo la visión de mundo dada por Newton a partir de las interacciones a distancia de manera instantánea y tomando el espacio de manera absoluta, de modo que este simplemente se define como aquello que relaciona un objeto y otro sin interferir directamente en la interacción, se entiende que difiere el entendimiento respecto a la teoría de campos. En esta segunda, se entiende la relación entre los objetos, e incluso la existencia de estos considerando el espacio en sí mismo.

Es por esto por lo que, para el entendimiento de una nueva teoría de campos, como lo es la electrodinámica cuántica, es necesario tener un buen entendimiento de los conceptos estructurales que definen las interacciones y el modo de estas.

Según Joseph D. Novak, basado en el pensamiento constructivista y desarrollando la Teoría de los Mapas Conceptuales teoriza que, para la adquisición de conocimiento relacionado a conceptos es importante la organización de estos a partir de relaciones y jerarquizaciones.

El concepto de campo se mantiene y define a partir del desarrollo de teorías físicas. Una forma de contextualizarlo y jerarquizarlo a partir de los cambios históricos y autores que desde sus posturas, pensamientos y experiencias lo consolidaron.

En ese sentido, para jerarquizarlos y organizarlos de manera coherente, la realización de herramientas metacognitivas como diagramas ayudan a los estudiantes a encontrar relación entre diferentes conceptos que les brindan contexto, tal y como mencionaba Vergnaud, y les permite la asimilación del concepto de campo, en este caso.

Es así como se busca que los estudiantes de pregrado a los que este trabajo está dirigido, al leer el documento y al analizar el conjunto de relaciones expuesto en el anexo logren una esquematización del concepto de campo aplicado a la teoría cuántica de campos y más precisamente a la electrodinámica cuántica teniendo en cuenta la estructuración histórica y como este desde diferentes contextos es abordado dentro de la comunidad científica.

Teniendo en cuenta la investigación realizada, se deja como material guía para abordar el concepto de campo trabajado a lo largo del Capítulo II y el mapa conceptual del Anexo, en el cual se unifican los ejes fundamentales en la construcción del concepto de campo, los cuales se basaron en lo establecido por Gerard Vergnaud en su teoría de campos conceptuales, lo cual permitió generar una guía para la revisión histórica y la contextualización realizadas.

CONCLUSIONES.

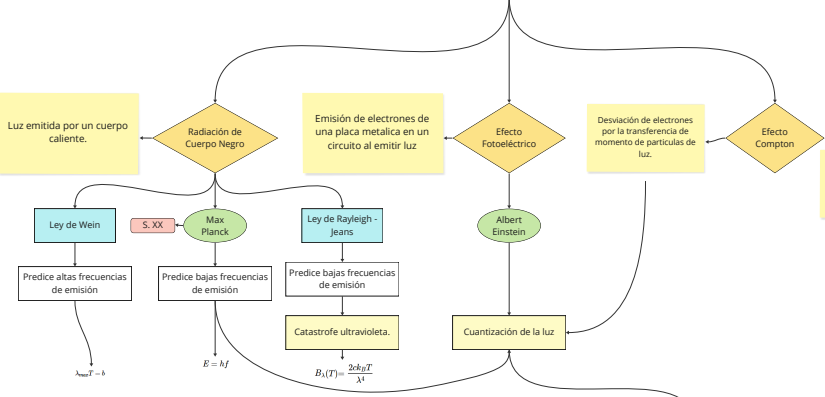
- Desde lo encontrado en el análisis de las concepciones filosóficas primigenias de espacio y su relación con la materia, hasta los primeros esbozos de la electrodinámica cuántica, se mostró la forma de estructurar el concepto de campo considerando la evolución de la física y los fenómenos estudiados en cada época, lo que fundamenta y define la interacción de los fenómenos eléctricos y magnéticos y los unifica con el de la luz.
- Teniendo en cuenta el desarrollo de la mecánica cuántica y las explicaciones dadas a la radiación de cuerpo negro, al efecto fotoeléctrico, el efecto Compton, el modelo atómico de Bohr, además de la consideración de velocidad de la luz como una constante refutando a la teoría del éter como medio de interacción mecánico de las ondas electromagnéticas, se muestran las condiciones relevantes en el desarrollo de la mecánica cuántica, donde se presenta una teoría electrodinámica teniendo en cuenta la cuantización de la luz desde una perspectiva de campos.
- Considerando el desarrollo histórico se permite contextualizar el concepto de campo desde un fundamento pedagógico considerando la teoría de campos conceptuales de Gerard Vergnaud, a partir de las relaciones históricas dadas desde las discusiones filosóficas del S. XVII hasta los principios de electrodinámica cuántica desde una síntesis de relaciones expuestas en el texto y en la herramienta metacognitiva del Anexo.

3. BIBLIOGRAFÍA

- Barrantes, H. (2006). La teoría de los campos conceptuales de Gerard Vergnaud. Costa Rica.
- Berkson, W. (1985). *Las teorías de campos de fuerza*.
- Blanco, J. D. (2013). Modelación del concepto de campo electromagnético: Caracterización del razonamiento seguido por Maxwell. Bogotá DC, Colombia: Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional.
- Candel, M. (s.f.). Democrito y Epicuro: El átomo como elemento y límite ontológico. pág. 20.
- Castro, A. d. (20 de Septiembre de 2018). *Revista Persea*. Obtenido de El sabio que vio las líneas invisibles: <https://revistapersea.com/matematicas-y-fisica-fundamental/faraday/>
- Colchero, J. A. (2021). La conceptualización del espacio: Un análisis de sus posibilidades interpretativas. *Universidad de Granada*.
- Comesaña, G. M. (1974). Democrito, Filósofo Atomista. *Universidad del Zulia*, 30.
- Coronado, W. A. (2015). De la acción a distancia al concepto de campo, Una discusión sobre la acción a distancia en términos del desarrollo de la teoría de campos de Faraday hasta Maxwell. Bogotá, Colombia: Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional.
- Coronado, W. A. (2015). DE LA ACCIÓN A DISTANCIA AL CONCEPTO DE CAMPO: Una discusión sobre la acción a distancia en términos del desarrollo de la teoría de campos de Faraday hasta Maxwell. Bogotá DC, Colombia: Departamento de Física - Universidad Pedagógica Nacional.
- Díaz, J. A. (2004). El papel de las analogías en la creatividad de los científicos: La teoría del campo electromagnético de Maxwell como caso paradigmático de la historia de las ciencias. *Revista Eureka*, 19.
- Dongo, A. (2008). La teoría de Piaget y sus consecuencias para la praxis educativa. *Universidad Estadual Paulista Campus de Marília*.
- Feynman, R. P. (1965). *Lectures on Physics - Quantum Mechanics*. Addison - Wesley.
- Gallego, J. D. (2007). Del concepto de paradigma en Thomas S. Kuhn, a los paradigmas de las ciencias de la cultura. 16.
- Henríquez, R. (2010). Importancia de la distinción cartesiana entre el hombre y los animales. *Universidad Complutense de Madrid*, 11.
- Henry, J. (2007). Isaac Newton: Science and Religion in de Unity of his Thought. *University of Edinburgh* , 34.

- Lopez, C. T. (10 de Mayo de 2016). *Cuaderno de Cultura Científica*. Obtenido de Las corrientes eléctricas actúan sobre los imanes:
<https://culturacientifica.com/2016/05/10/las-corrientes-electricas-actuan-los-imanos/>
- Manzanares, J. A. (2015). Mi clásico favorito: William Thompson (Lord Kelvin). *Universiry of Valencia*, 11.
- Maxwell, J. C. (1861). On Phisical Lines of Force. *Philosophical Magazine and Journal Science*, 62.
- Monsalvo., K. R. (2009). Radiación Electromagnética. *Universidad Pontificia Bolivariana*, 13.
- Moreno, D. M. (2018). El Descartes de Spinoza. *Revista Laguna*, 29-46.
- Redmount, I. H. (2019, August 6). Music of the Spheres: Teaching Quantum Field Theory at the Introductory Level. Missouri, United States of America: Saint Louis University-Department of Physics.
- Sánchez, M. A. (2010). *Fuerza Magnética entre Corrientes. Definición de Amperio*. Obtenido de Sección Local de Alicante de la Real Sociedad Española de Física.
- Serra, M. (13 de Julio de 2015). *Wikipedia*. Obtenido de Interferómetro de Michelson:
https://es.wikipedia.org/wiki/Interferómetro_de_Michelson#/media/Archivo:Arreglo_simplificado_del_Interferómetro_de_Michelson.svg
- Sicard, G. A. (2008). *Electricidad y magnetismo*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Soto, C. (2017). ¿Qué es la metafísica de la ciencia? *Universidad de Chile*, 19.
- Stolijiovic, D. (2015). *Roger Boscovich - The founder of modern science*.
- Suzuki, M. S. (2013). Understanding of the Davinsson - Gerner experiment. *Department of Physics, SUNY at Binghamtom*, 2.
- Ulloa Cataño, A. E., & Paque Burgos, D. A. (2014). Caracterización de los fenómenos electrostáticos desde una perspectiva de campos. Bogotá DC, Colombia: Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional.
- Weinberger, P. (2014). Neils Bohr and the Dawn of Quantum Theory. *Philosophical Magazine*, 12.
- Zamarro, J. M. (13 de Enero de 2010). *Universidad de Murcia*. Obtenido de Inducción electromagnética: Ley de Lenz-Faraday. Flujo Magnético:
https://webs.um.es/jmz/www_electromagnetismo/inducccion/inducccion.html

La mecánica cuántica y la luz.



La mecánica cuántica y la materia.

