

Sobre el Potencial Vectorial en Mecánica Cuántica

David Forero Andrade

Trabajo de grado presentado para optar al título de:
LICENCIADO EN FÍSICA

Asesor:
Profesor Mauricio Rozo Clavijo.

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ. COLOMBIA

2017

Sobre el Potencial Vectorial en Mecánica Cuántica

David Forero Andrade


Línea de profundización II: La enseñanza de la física y la relación físicomatemática

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ. COLOMBIA

2017

 UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL <i>Escuela de Pedagogía</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 47	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Sobre el potencial vectorial en mecánica cuántica
Autor(es)	Forero Andrade, David
Director	Rozo Clavijo, Mauricio
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2017, 36 P.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	FENÓMENO, ELECTRICIDAD, MAGNETISMO, ESTADO ELECTRO-TÓNICO, POTENCIAL VECTORIAL, CAMPO MAGNÉTICO, FLUJO MAGNÉTICO, SOLENOIDE, INTERFERENCIA.

2. Descripción
<p>En este trabajo de grado se puede ver cómo se aborda la enseñanza de la física cuántica, cuáles son algunos de los inconvenientes que se generan en los estudiantes al abordar temas relacionados con la mecánica cuántica.</p> <p>Se muestra el desarrollo que ha tenido el concepto de potencial vectorial, desde la teoría electromagnética clásica hasta la mecánica cuántica; haciendo un análisis cronológico, desde los experimentos iniciales para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos, pasando por el concepto de estado electro-tónico y la matematización del potencial vectorial, hasta la manera en que el proceso experimental, desde un contexto cuántico, muestra la naturaleza física que tiene potencial vectorial.</p> <p>Se observa que el fenómeno juega un papel trascendental para mostrar que el potencial vectorial efectivamente tiene un carácter físico, y no es un ente puramente matemático como se asumía en la teoría electromagnética clásica. El nuevo enfoque del potencial vectorial se da en un contexto de la mecánica cuántica.</p>

3. Fuentes

Aharonov. Y. y Bohm D. (1959). THE PHYSICAL REVIEW. Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory. Second Series, Vol. 115, No. 3.

Bob Chambers, (1924-2016) <http://www.bristol.ac.uk/news/2017/january/bob-chambers.html>

Colciencias. (2016), presupuesto anual Colciencias. Recuperado de:

http://www.colciencias.gov.co/colciencias/informacion_financiera_contable/ejecucion

Feynman R. P. y Leighton R.B. (1963). The Feynman Lectures on Physics. Vol. I y II. California Institute of Technology y Matthew Sands. Stanford University.

Greca. I. M. y Herscovitz E. V. Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. Instituto de Física, Universidad Federal do Rio Grande do Sul.

José Romo Feíto. (1991). El concepto de estado electro-tónico en Faraday. Universidad de Barcelona. Barcelona España.

Luis A. Montero Cabrera y Lourdes A. Díaz, (2003). Universidad de La Habana, Cuba recuperado de: http://karin.fq.uh.cu/fqt/fqt_archivos/superpos_estados.pdf

Lewis H. R. (1996). Quantum Field Theory. Second edition. Cambridge Inglaterra.

Malagón. S. F. Sandoval. O. S. Ayala. M. M. M. (2013). LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL: CONSTRUCCIÓN DE FENOMENOLOGÍAS Y PROCESOS DE FORMALIZACIÓN. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá Colombia.

Maxwell J. C. (1873). A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. I y II. Oxford. Reino

Unido.

Maxwell J. C. (1864). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field.

Maxwell J. C. (1965) The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, Vol. I. Canada.

Moreira, M. (2002). MODELOS MENTALES Y MODELOS CONCEPTUALES Publicado en la Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, Porto Alegre.

Moreira, M. A. y Greca, I. M. Obstáculos Representacionales Mentales en el Aprendizaje de Conceptos Cuánticos. Instituto de Física da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Mostafa E. El Demery. (2013). New Perspectives on the Aharonov-Bohm Effect. St Edmund's College. Cambridge Inglaterra.

Oliver Orasch. (2014). The Aharonov-Bohm-Effect. Universidad de Graz. Estiria Austria.

Pérez, G. (1986). ANALISIS CRITICO DE LA INTRODUCCION DE LA FISICA MODERNA EN LA ENSEÑANZA MEDIA, revista de enseñanza de la física. Recuperado de:

<http://roderic.uv.es/handle/10550/44206>

Pérez, G. (1986). Física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados revista de enseñanza de la física. Recuperado de:

<http://roderic.uv.es/handle/10550/44250>

Rozo C. M. Ávila T. S. Walteros. A. (2015). Sobre el estado electro-tónico y su interpretación: El Potencial Vectorial. Revista Científica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Sinarcas, V. (2013). DIFICULTADES EN EL APRENDIZAJE Y LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA CUÁNTICA EN EL BACHILLERATO, ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS Revista de

investigación y experiencias didácticas, Núm. 31.3 (2013): 9-25, recuperado de:

<http://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/285801>

Socorro. E (2013). Dificultades en el proceso enseñanza aprendizaje de la Física. Revista

Presencia Universitaria, Año 3, Enero – Junio. Recuperado de:

[http://eprints.uanl.mx/3368/1/Dificultades_en_el_proceso_ense%C3%B1anza_aprendizaje_de_la_F%C3%](http://eprints.uanl.mx/3368/1/Dificultades_en_el_proceso_ense%C3%B1anza_aprendizaje_de_la_F%C3%ADsica.pdf)

[ADsica.pdf](http://eprints.uanl.mx/3368/1/Dificultades_en_el_proceso_ense%C3%B1anza_aprendizaje_de_la_F%C3%ADsica.pdf)

Sepúlveda A. S. (2008). Electromagnetismo. Medellín Colombia.

Sandra Bibiana Ávila Torres. (2013). Sobre La Naturaleza del Potencial Vectorial, su Sentido y Significado. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá Colombia.

4. Contenidos

CAPÍTULO 1: SOBRE LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.

En éste capítulo se realiza una exploración acerca de las problemáticas o inconvenientes que presentan los estudiantes que se enfrentan a los temas de la mecánica cuántica. También se muestra una propuesta en donde se dan unas pautas para que la enseñanza de la física cuántica tenga una mejor acogida y los estudiantes afiancen mucho mejor los conceptos básicos de la materia.

En este capítulo también se puede ver cuáles son los errores más recurrentes de algunos estudiantes en el estudio de la cuántica, y cómo se pueden minimizar dichos errores.

Se muestra también el rol que tiene la actividad experimental o el fenómeno como tal, en la construcción y la formalización de nuevas teorías o conceptos.

CAPÍTULO 2: SOBRE EL POTENCIAL VECTORIAL: UNA MIRADA DESDE EL CONTEXTO CLÁSICO.

En éste capítulo se puede ver los antecedentes históricos que estructuraron el concepto de potencial vectorial desde el contexto del electromagnetismo clásico.

Comenzando con uno de los primeros artículos que se enfoca en los fenómenos eléctricos y magnéticos; luego se hace referencia a los aportes hechos por Oersted y Ampère, por medio de una serie de experimentos, que muestran la relación de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Se muestra también que Michael Faraday fue uno de los pensadores más influyentes, en los temas relacionados con los fenómenos eléctricos y magnéticos. Él, por medio de experimentos centra su

investigación en el tema de inducción. Uno de los aportes más significativos que hizo fue, que introdujo el concepto de estado electro-tónico, concepto que es el eje fundamental de la formalización del concepto de potencial vectorial.

Por último se observa cómo Maxwell, también, por medio de la actividad experimental se aproxima al estudio del fenómeno de inducción, desprendiéndose de esta actividad conceptos y aportes importantes para la teoría electromagnética como la dependencia que tiene la fuerza electromotriz con el cambio del número de las líneas de acción magnética inductiva que pasa por un circuito, entre otros aportes. Al tema de inducción de la corriente, Maxwell le da un tratamiento especial, con base en la idea de estado electro-tónico. Él incorpora una formalización matemática a la acción magnética que existe entre las corrientes eléctricas y las regiones que están influenciadas por un imán. La matematización la hace por medio de unas componentes del estado electro-tónico que se relacionan a su vez con unas componentes de la fuerza electromotriz;

La relación de dichas componentes hizo que el estado electro-tónico tuviera un carácter matemático vectorial, lo cual le dio una estructura bien definida al concepto.

Maxwell le cambia el nombre al estado electro-tónico, por el de momento electromagnético, que luego sería llamado potencial vectorial.

El potencial vectorial nace gracias a la formalización del estado electro-tónico, y es una cantidad importante en la teoría electromagnética.

CAPÍTULO 3: EL POTENCIAL VECTORIAL: UNA MIRADA DESDE EL CONTEXTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.

Este capítulo muestra cómo es necesario darle otro enfoque, al concepto del potencial vectorial, desde el contexto de la física cuántica. Por medio de una propuesta experimental, que hacen los científicos Yakir Aharonov y David Bohm en un artículo científico publicado en Agosto de 1959, se plantea que el concepto de potencial vectorial tiene un carácter físico y no solamente es un ente puramente matemático como se pensaba en el contexto clásico.

La propuesta se centra en un experimento en donde se tiene un haz de electrones que es dirigido hacia una pared en donde hay dos rendijas por donde pasan los electrones, y van a chocar a una pantalla en donde contabilizados con un detector. Detrás de la pared se encuentra un solenoide de dimensiones microscópicas, que genera un campo magnético y, por ende un potencial vectorial. Cuando los electrones pasan a través de las rendijas sin que este encendido el solenoide, se genera un patrón de interferencia en la pantalla. Ahora si se repite la experiencia, pero esta vez con el solenoide encendido, se encuentra que también se produce un patrón de interferencia, pero se observa que este nuevo patrón, sufre un corrimiento con respecto al primero. Corrimiento que es atribuido al potencial vectorial, pues el campo magnético es nulo en la región por donde transitan los electrones.

En el artículo de Aharonov y Bohm se plantea el experimento pero ellos no lo realizan. El experimento es realizado por Bob Chamber en la universidad de Bristol en Inglaterra, un año después de la publicación del artículo. Los resultados que se obtuvieron fueron coincidentes con lo

que precedían Aharonov y Bohm, concluyendo con esto que el potencial vectorial tiene un carácter físico y no solamente es un ente puramente matemático como se decía en contexto clásico.

5. Metodología

Este trabajo tiene un enfoque fenomenológico, con el objetivo de mostrar la naturaleza que tiene el concepto de potencial vectorial, y de observar la nueva interpretación que se le da al concepto, desde el enfoque de la física cuántica, con la intención de revelar la importancia que tiene el carácter físico del potencial vectorial.

Se muestra el desarrollo histórico y las contribuciones importantes de algunos pensadores que dieron estructura al concepto del potencial vectorial. Haciendo énfasis siempre a la actividad experimental que acompañó el desarrollo del concepto.

También se hace un análisis del desarrollo matemático que se muestra en un artículo en el cual sugieren una nueva interpretación que se le debe dar al potencial vectorial.

6. Conclusiones

Los pensadores que estructuraron el concepto de potencial vectorial lo hicieron tomando como eje fundamental la actividad experimental, Pues fue con base en los fenómenos observados al realizar la actividad experimental que se dieron las explicaciones de dichos fenómenos.

El concepto de Estado electro-tónico es el que permite determinar la característica del espacio que está influenciada por una corriente eléctrica y un campo magnético. Éste concepto es fundamental para determinar la teoría electromagnética clásica de Maxwell

En electromagnetismo clásico el potencial vectorial no tiene significado físico debido a que la ecuación de movimiento involucra solo los campos magnético y eléctrico. Debido a esto el potencial se considera como un auxiliar puramente matemático para resolver problemas del electromagnetismo.

En la física cuántica una partícula puede ser influenciada por el potencial vectorial, inclusive si dicha partícula se encuentra en una región en donde el campo magnético es nulo.

El potencial vectorial se considera como un campo vectorial físico, debido a que genera efectos perceptibles en las partículas.

Elaborado por:	David Forero Andrade
Revisado por:	Mauricio Rozo Clavijo

Fecha de elaboración del Resumen:	17	01	2018
--	----	----	------

Contenido

Introducción.....	1
Justificación.....	3
Capítulo 1	5
Sobre la enseñanza de la mecánica cuántica.....	5
Los Modelos mentales y la Mecánica Cuántica.	6
El aprendizaje de la mecánica cuántica	8
Capítulo 2	11
Sobre el potencial vectorial: una mirada desde el contexto clásico.....	11
Antecedentes Históricos	11
El Estado Electro-Tónico de Faraday.....	14
Maxwell: La matematización del Potencial Vectorial	18
Capítulo 3	23
El potencial vectorial: una mirada desde el contexto de la mecánica cuántica	23
Sobre el potencial vectorial	23
Conclusiones	32
Bibliografía	34

Lista de Figuras

Figura 1. Corrientes paralelas en la misma dirección.....	13
Figura 2. Corriente cerca de aguja imantada	14
Figura 3. Anillo de hierro con alambres enrollados.....	16
Figura 4. Campo magnético en el interior del solenoide y potencial vectorial por fuera....	24
Figura 5. Haz de electrones rodeando un solenoide.....	24
Figura 6. Esquema de propuesta No 3 de Aharonov-Bohm.....	26
Figura 7. Comparación del patrón de interferencia, a) sin solenoide y b) con solenoide....	29

Introducción

En el ámbito de la educación como en otras actividades, se presentan cambios constantemente, que son generados por los diferentes actores de dicha actividad. En el caso de la educación los cambios son generados en parte por la misma evolución del conocimiento. En ciencias, y en particular en física, los cambios son debidos a los nuevos conocimientos y a los descubrimientos que constantemente se están dando. Puntualmente la mecánica cuántica es uno de ellos.

El desarrollo que ha tenido la cuántica a través de los años ha hecho que su estudio, y posteriormente su enseñanza, sean cada vez más importantes, y más necesarios. Los avances y descubrimientos de la física cuántica han hecho de esta materia un tema obligado en el constante crecimiento del ser humano. Al ser un tema relativamente nuevo existen dificultades en su estudio y en su enseñanza. Los conceptos que se abordan son de difícil asimilación; se necesita una actitud de aprendizaje y una buena dosis de constancia debido a que los temas no se comprenden en un primer momento.

La actividad experimental es una herramienta apropiada para la estructuración y la creación de teorías y de conceptos. Y para la física cuántica no es la excepción, pues debido a los experimentos y a los fenómenos observados, se han desarrollado los conceptos de dicha materia.

Como también ha sucedido lo mismo con los conceptos relacionados a los fenómenos eléctricos y magnéticos. Como es el caso del potencial vectorial, que su creación y su organización se dio con base en la observación y la realización de experimentos. Dichos experimentos fueron hechos e ideados por pensadores, quienes a su vez analizaron y construyeron las teorías del concepto de potencial vectorial.

Este concepto es un factor importante en cuanto a la formalización de la teoría electromagnética clásica. Sin embargo se observa que el potencial vectorial muestra utilidad solamente como

herramienta matemática para hallar los campos eléctrico y magnético. Esta naturaleza del potencial vectorial disminuye su comprensión y lo hace abstracto, condición que obstaculiza un total entendimiento del concepto por parte de los estudiantes.

Con base en lo anterior se plantea una nueva interpretación del concepto de potencial vectorial, enmarcado en el contexto de la mecánica cuántica, con la intención de aclarar y evidenciar la naturaleza física.

De acuerdo con esto, en el primer capítulo se expone una metodología fenomenológica para tratar de abordar los temas relacionados con la comprensión y el entendimiento del potencial vectorial, desde los contextos clásico y cuántico. Se expone también en el capítulo algunos aportes que hace Marco Antonio Moreira.

Se realiza un análisis cronológico en el capítulo 2, acerca del potencial vectorial, desde el primer texto referente a los fenómenos eléctricos y magnéticos, pasando por los experimentos más relevantes y significativos. También se muestra cómo el concepto de estado electro-tónico que introdujo Faraday forma parte importante en la construcción del potencial vectorial.

Finalmente en éste capítulo se expone cómo Maxwell, por medio del análisis y la repetición de algunos experimentos establece y desarrolla el tema de la inducción de la corriente. Con base en la idea de estado electro-tónico de Faraday, Maxwell logra darle una estructura matemática al potencial vectorial.

En el último capítulo, se aborda una propuesta experimental de un artículo científico, en donde se propone darle otra interpretación al potencial vectorial. En el artículo se propone un experimento que está enmarcado en el contexto de la mecánica cuántica.

Justificación

La motivación de este trabajo es la de mostrar que el potencial vectorial tiene una realidad física, y no solamente una importancia matemática, pues se ha visto el aporte que tiene éste en la simplificación de procesos matemáticos para la resolución de problemas electromagnéticos. El potencial vectorial agiliza cálculos que tienen que ver con el flujo magnético. En electromagnetismo cuando se trata de la enseñanza de éste, se acostumbra a utilizarlo como un ente puramente matemático para solucionar problemas electromagnéticos, y se hace énfasis solo en la relación que existe entre el campo magnético y el potencial vectorial.

Se ve entonces la necesidad de esclarecer la naturaleza que tiene dicho concepto; si en realidad únicamente el potencial sirve como una herramienta matemática, o si tiene un carácter físico.

Es necesario tener propuestas pedagógicas que se enfoquen en la actividad, dándoles forma a los modelos explicativos para que los estudiantes se formen una imagen del fenómeno.

Por medio de la observación y el análisis de algunas propuestas experimentales, que son la base del electromagnetismo, se pretende esclarecer la naturaleza del concepto de potencial vectorial.

Pregunta Problema

¿El potencial vectorial tiene realidad física, o simplemente es un ente matemático conveniente para realizar cálculos?

Objetivo General

Realizar una exploración sobre la naturaleza del potencial vectorial, dentro del contexto de la

mecánica cuántica.

Objetivos Específicos

- Realizar un estudio del desarrollo que ha tenido el concepto de vector potencial a lo largo de la historia
- Analizar el concepto de potencial vectorial desde un enfoque experimental.
- Proponer un montaje experimental para la evidencia del potencial vectorial.
- Explorar los inconvenientes por los cuales no ha sido difundido en los libros con tanto rigor o detalle, el concepto de potencial vectorial.

Capítulo 1

Sobre la enseñanza de la mecánica cuántica

La mecánica cuántica tiene una gran acogida por los físicos actuales, ya que esta rama de la Física muestra un concepto independiente a la física clásica, se le considera, de hecho, revolucionaria, puesto que, da otro enfoque a los fenómenos que no se podían describir antes del siglo XVIII con la física existente. Esta teoría ha llegado a ser relevante en los círculos científicos debido a su influencia en el pensamiento humano. Debido a esto, y dada su importancia en el mundo moderno, es necesario conocer cuáles son las dificultades que se presentan a la hora de abordar la mecánica cuántica para los estudiantes de nivel universitario.

Los docentes y los directivos de los planteles universitarios han buscado conocer las dificultades que se presentan dentro de su alumnado y planta profesoral respecto a la reproducción del conocimiento, esto sin ser distinto entre las áreas de las matemáticas, donde siempre se ha buscado generar un interés permanente en la búsqueda de nuevos conocimientos.

Las universidades promueven la investigación y el desarrollo de forma continua, y esto es evidente, puesto que a medida que pasa el tiempo, el presupuesto para la investigación a nivel mundial va en aumento; en Colombia en el año 2016 el presupuesto anual de Colciencias fue de \$ 306.687 millones, mientras que para el año 2017 el presupuesto anual fue de \$ 379.118 millones (Colciencias, 2016), aumento que deja en claro el interés que se muestra por la proyección empresarial e investigativa en el país. Este deseo se da, entre otras cosas, por el auge y el crecimiento de las aplicaciones científicas como la mecánica cuántica en la tecnología actual y en la utilidad que ésta ha tenido en distintas carreras de la ciencia como la medicina, la biología, la comunicación y la economía.

Con respecto a eso, la física cuántica está presente en instrumentos de uso diario como el

teléfono celular o el computador, hasta la complejidad que tienen los procesos en la nanotecnología o en la medicina con máquinas de resonancia.

Debido a esto, es entonces necesario y ético que quienes estudian los principios fundamentales de la física conozcan de forma completa sus principios, y por ende todo lo relacionado con los temas cuánticos debe ser bien entendido, y tener total dominio sobre ellos y no solo conocer algunas reglas o algoritmos de resolución.

Investigaciones relacionadas (Greca. I. M. y Herscovitz E. V.) sobre las ideas que los estudiantes universitarios tienen sobre temas cuánticos, como la estabilidad del átomo, la dualidad onda-partícula, y el principio de incertidumbre entre otros, muestran que lo que conocen los estudiantes de la disciplina no es tan profundo como en realidad debería ser, sino que ésta línea de conocimientos entendidos como básicos por los grandes físicos, se han generado a duras penas como una reunión de conceptos, afianzados únicamente con el fin y la motivación de aprobar una materia.

Además de esto, se puede observar que los estudiantes que abordan temas de cuántica lo están haciendo desde el punto de vista de la física clásica, y se están utilizando los conocimientos de forma indiscriminada (Moreira, 2002). En este punto, cabe aclarar que no se está descartando la física clásica o mecánica, pues es claro que dicha área es importante al igual que la cuántica, sino que se expresa la preocupación que los estudiantes, (incluyendo graduados y participantes de cursos avanzados) no están diferenciando sus teorías, lo que conlleva a una serie de conclusiones erróneas por parte de los estudiantes, donde la física cuántica es subestimada por los mismos y alejada de sus proyectos.

Los Modelos mentales y la Mecánica Cuántica.

Para entender el mundo, se construyen modelos mentales que sirven para dar forma a

determinados fenómenos o escenarios del mundo real. Entonces, lo realmente necesario para la comprensión de dichos fenómenos reside en la habilidad de crear y modificar dichos modelos, para que estos expliquen determinadas situaciones y/o fenómenos naturales.

Por consiguiente, los estudiantes deben tener la capacidad de crear modelos mentales que estén orientados en la misma dirección de los modelos que se aceptan científicamente, para entender las ideas y las leyes de cierta teoría científica.

De acuerdo con las investigaciones acerca de los conceptos cuánticos que manejan los estudiantes, es correcto afirmar que la mayoría de los estudiantes no son capaces, ni tienen el conocimiento suficiente, para la elaboración de modelos mentales que les dejen observar, desde el punto de vista de la cuántica, los fenómenos microscópicos; esto se debe a que las teorías básicas implicadas en la cuántica están siendo captadas y analizadas no por su rama, sino a partir de la fenomenología y la física clásica, de manera tal que los estudiantes no pueden realizar explicaciones o hacer predicciones con relación a las ideas científicamente aceptadas.

Ahora, la situación con la mecánica cuántica se complica un poco más, ya que no cuenta con una fenomenología directa con nuestros sentidos, es decir no existe percepción alguna con los sentidos.

Las ideas que cuentan con mayor relevancia en la mecánica cuántica, y que la hacen diferente a la percepción clásica son aquellas ideas que vienen del concepto de superposición lineal de estados, del principio de incertidumbre, y de la naturaleza probabilística de los resultados de la medición. En estas teorías se deben crear estrategias que faciliten la formación de núcleos que proporcionen la visualización de los fenómenos, y que los estudiantes se apropien de los conceptos para así tener dominio sobre el tema.

Al introducir al estudiante en la teoría cuántica, los conceptos no hacen parte de su estructura cognitiva, y lo que tienden a hacer es relacionar lo cuántico con lo clásico. Debido a esto, es positivo orientar al estudiante hacia los experimentos y los temas que se enfocan en los primeros principios de la mecánica cuántica. Se deben convertir estos principios en conceptos más tangibles y más naturales, de manera que no sean solo relaciones matemáticas que se memorizan, sino que tengan un significado físico. Si al estudiante se le muestran las consecuencias de los principios cuánticos sobre la realidad, se le dan elementos importantes para la creación de modelos mentales. De esta manera se está generando en los estudiantes una forma de observar el mundo microscópico.

Para que los estudiantes realicen modelos mentales es importante que éstos interactúen con otros estudiantes y también es importante que se apoyen en los docentes. Es decir, que el estudiante apropie los conceptos mediante la generación de los modelos mentales. Los estudiantes deben socializar y debatir junto con el docente, para apropiarse de los conceptos cuánticos, y para poner en conocimiento los modelos mentales que cada estudiante hace; así también se corrigen los modelos y se hacen más perfectos.

El aprendizaje de la mecánica cuántica

Los alumnos universitarios de cursos de mecánica cuántica no captan a profundidad los conceptos físicos de la materia debido a que utilizan las ideas de la física clásica como instrumento para poder entender los conceptos de la física cuántica. Los conceptos de la física clásica actúan como obstáculos representacionales mentales, que hacen que el estudiante trate de dar significado a la cuántica por medio de los conceptos previos clásicos.

Debido a la poca efectividad que genera el utilizar los conceptos clásicos para entender los conceptos cuánticos, se da una propuesta (Moreira. M. A. y Greca. I. M.) en donde la mecánica cuántica se imparta sin derivaciones de los conceptos clásicos, y se olviden totalmente de estos

conceptos, y en cambio se centren en los aspectos singulares del formalismo cuántico. En este trabajo solo se van a mencionar algunos aspectos interesantes de la propuesta, más no la propuesta en su totalidad. Los aspectos más importantes entre muchos otros, son que el estudiante debe:

(Moreira M. A. Greca I. M.)

- No referirse en lo posible a la física clásica.
- Comenzar el estudio con electrones y no con fotones, cuando se ve el efecto fotoeléctrico.
- Explicar los fenómenos por medio de la interpretación estadística y no hacerlas por medio de descripciones dualísticas.
- Evitar el modelo de Bohr.

Al poner en práctica la propuesta, se generan conflictos cognitivos en los estudiantes, induciendo a los estudiantes a replantear y corregir sus posiciones anteriores, y con ello, formar su conocimiento.

Una buena manera de enseñar la física cuántica es intentar que los estudiantes tomen los nuevos conceptos de la misma manera que hicieron con los conceptos clásicos, es decir la formación de conceptos en los primeros años de infancia. Para tal fin se aborda el estudio de una manera que se denomina fenomenológico-conceptual, destacando la naturaleza cuántica de los sistemas en vez de hacer comparaciones clásicas. La parte central de la propuesta consiste en la presentación de fenómenos simples, en donde se observe la diferencia entre lo cuántico y lo clásico.

La propuesta busca mostrar de manera explícita las ideas cuánticas más importantes, cerrándole la puerta a los conceptos clásicos. De esta manera se quiere que los estudiantes aprendan a percatarse de los fenómenos a partir del contexto cuántico, sin que intervengan los obstáculos representacionales.

De acuerdo con eso, el concepto de potencial vectorial es un claro ejemplo para poderlo explicar desde el contexto de la mecánica cuántica, en donde se puede observar las características físicas que tiene dicho concepto, y que no es solamente una herramienta matemática como se muestra en la teoría electromagnética clásica.

Con relación a esto, el artículo de Yakir Aharonov y David Bohm (Aharonov Y. Bohm D. 1959.) sobre el cual se basa este trabajo de grado, está enfocado en la actividad experimental para darle un nuevo tratamiento al concepto del potencial vectorial.

Con base en la parte experimental para la observación del fenómeno, se crea una comprensión cognitiva que da explicaciones de lo que está pasando, en este caso el comportamiento de los electrones (que se explica en el tercer capítulo). Las explicaciones se dan de acuerdo a lo que muestra el fenómeno, como lo dice la perspectiva fenomenológica. “Todas las explicaciones, todo lo que se hace alrededor del fenómeno, estaría en relación con lo que éste muestre”. (Malagón F. Sandoval S. Ayala M. M. 2013).

El fenómeno aparece ante una conciencia, en donde existe una relación bilateral entre los dos. El fenómeno aparece y la conciencia crea una estructura cognitiva que organiza las observaciones alrededor de la experiencia. Debido a esto las aclaraciones y los resultados obtenidos del fenómeno, se dan con relación a la organización de lo que se percibe, de lo que el fenómeno muestra.

Capítulo 2

Sobre el potencial vectorial: una mirada desde el contexto clásico

Antecedentes Históricos

Los fenómenos relacionados con electricidad y magnetismo, se conocen desde el año 800 a.c, con la propiedad que tenían algunos materiales como el ámbar, que atraía algunos cuerpos al ser frotado. Además los fenómenos magnéticos se conocían por los efectos que ciertos materiales de algunas rocas tenían, que era el de atraer pedazos de hierro.

Varios años después, en 1600 se publicó en latín el primer libro relacionado con los imanes, que tenía por nombre “De Magnete” escrito por William Gilbert (Gilbert, 1600). Allí se recogen todos los detalles del magnetismo que se conocían por ese tiempo. William Gilbert inventa un aparato que está hecho con una aguja de acero imantada, suspendida por una cuerda, con el que se medía los ángulos de atracción entre imanes. También explica que la parte “norte” de una brújula es similar al polo sur de la tierra, la cual consideraba un imán de grandes proporciones. Además asumió que el hierro pierde sus características magnéticas al ser calentado a cierta temperatura, y retomándolas si es enfriado y golpeado. Así William Gilbert es uno de los científicos que empezó a publicar y dar a conocer los fenómenos eléctricos y magnéticos.

El concepto de potencial vectorial es uno de esos casos, y para abordar dicho concepto se debe hacer referencia principalmente a Michael Faraday quien fue uno de los pensadores más destacados del siglo XIX, y quien era miembro de Royal Society. En aquella época publicó “Historical Sketch of Electro-magnetism” (Faraday, M. 1821), mostrando los resultados de sus investigaciones en torno a los experimentos realizados por Oersted y Ampere, y que luego el mismo Michael Faraday realizó, obteniendo nuevos resultados que complementaron los aportes hechos inicialmente por Hans Christian Oersted y André Marie Ampère.

Entre los experimentos realizados por Oersted, se haya uno en el que mostró que el origen de las fuerzas fundamentales eran de naturaleza eléctrica, siendo la fuerza repulsiva y la fuerza atractiva las fuerzas fundamentales; ahora la fuerza repulsiva se asumía que actuaba únicamente cuando los cuerpos estaban en contacto, y la fuerza atractiva se asumía también que actuaba a distancia de acuerdo a la ley del inverso al cuadrado.

Oersted buscaba evidencias acerca de fenómenos electromagnéticos y en 1820 muestra los resultados de su investigación en donde se enfoca en los efectos magnéticos sobre una aguja imantada que está al lado de un hilo conductor conectado a una pila. Lo que observo Oersted era que cuando el alambre y los lados de la pila estaban en contacto los efectos magnéticos sobre la aguja eran constantes, llevando esto a pensar que existía una estrecha relación entre electricidad y magnetismo.

En este orden de ideas, le da el nombre de “Conflicto eléctrico” a la relación que existe entre electricidad y magnetismo. Además, dicha interacción no tenía igual en la naturaleza, ya que la fuerza que hace el alambre sobre el polo de la aguja magnética es transversal al alambre. Dicho comportamiento generó nuevos cuestionamientos acerca de cuál era el funcionamiento de las fuerzas eléctricas y magnéticas entre sí.

Por otra parte, André-Marie Ampere, quien con su trabajo también influenció a Faraday, era partidario de la diferencia que había entre los fenómenos eléctricos y magnéticos, pero después al observar los descubrimientos de Oersted, cambia su manera de abordar el tema. Ampere realiza el experimento de Oersted y observa que el efecto es debido a dos factores que son la corriente que pasa por el conductor y al magnetismo terrestre. Utiliza una aguja denominada astática que no es afectada por el magnetismo de la tierra eliminando así toda interacción externa y observando los efectos generados por la corriente en el conductor. Es así como logra observar que la acción de la

corriente hacia la aguja es de manera perpendicular a la corriente.

Los trabajos de Ampere tenían la intención de evidenciar la relación que existía entre la electricidad y el magnetismo, entonces decide realizar nuevamente los experimentos que hizo Oersted, pero en vez de utilizar una aguja imantada utiliza un alambre por donde circula una corriente (Figura 1), y observa que al haber dos corrientes paralelas y en la misma dirección, existe una atracción entre los conductores, y que si las direcciones son en sentido contrario, la acción es de repulsión entre los conductores.

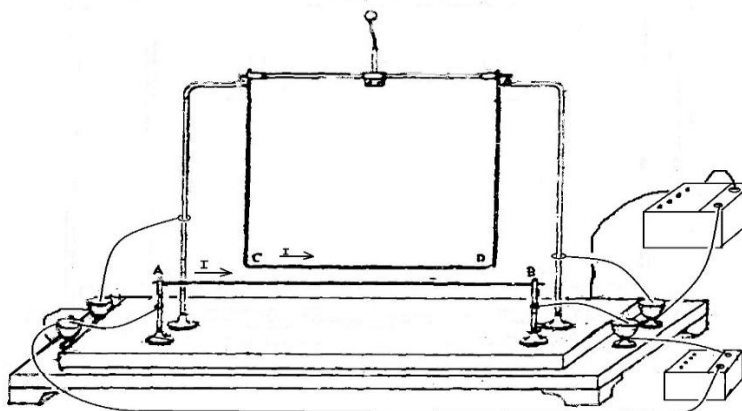


Figura 1. Corrientes paralelas en la misma dirección. (<http://www.feriadelasciencias.unam.mx/antiores/feria15/telegrafo.pdf>)

Ampère por medio de estos experimentos y observando la similitud que tienen los comportamientos de las corrientes con el comportamiento de los imanes, llega a la conclusión, que el magnetismo se puede obtener a partir de corrientes eléctricas.

Toda esta construcción y todo lo que obtuvo de la realización de los experimentos, le dio argumentos para afirmar que dichas interacciones tenían carácter newtoniano, pues la fuerza entre las corrientes es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los cables conductores. Emerge en ese momento el planteamiento de si la mecánica newtoniana es la más

apta para explicar la relación que se veía entre electricidad y magnetismo. De todas maneras el aporte de Ampère establece una formalización de la interacción que hay entre las corrientes eléctricas de los experimentos mencionados.

El Estado Electro-Tónico de Faraday

Michael Faraday realiza nuevamente los experimentos de Oersted y Ampere modificándolos y observando que existían situaciones de las que ellos no se habían percatado o no las habían observado; como que al poner una aguja perpendicularmente a un alambre por el que circula una corriente (figura 2), y mover la corriente hacia los polos del imán (aguja), existen zonas en donde se siente atracción y repulsión.

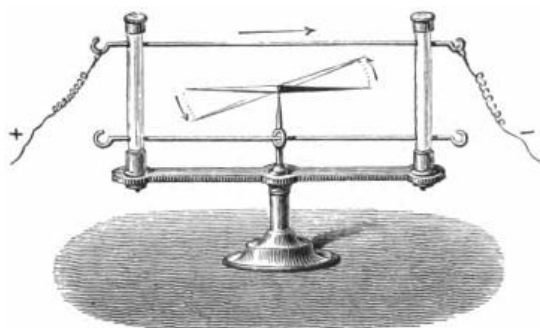


Figura 2. Corriente cerca de aguja imantada. Tomada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oersted_experiment.png

Ampere observó que existía una cierta interacción de atracción o repulsión entre corrientes como se mencionó antes; mientras que Faraday observa que en las descripciones hechas anteriormente existen fenómenos que no se están teniendo en cuenta, como es el caso de una fuerza alrededor del alambre que hace que el polo del imán gire alrededor del éste.

Faraday da importancia al comportamiento del alambre alrededor del polo del imán. Así él abre un nuevo camino de investigación en cuanto a la fenomenología del electromagnetismo, camino que desarrollaría él mismo durante los siguientes años. Estudió los comportamientos entre la electricidad y el electromagnetismo y observa que no se puede reducir dicha interacción

únicamente a interacciones de corriente como Ampère afirmaba. Es allí en donde Faraday cambia de interpretación, y en vez de hablar de fluidos eléctricos le da otra interpretación a la corriente como un estado en el que se encuentran los materiales conductores o alambres conductores, y establece que un alambre interactuando con el polo de un imán se encuentra en un estado diferente al habitual, al que le dio el nombre de estado electro-tónico. Esto hace que Faraday se aparte del pensamiento Newtoniano que predominaba en esos momentos.

Es importante observar que las ideas de Faraday sobre la corriente eléctrica no van en concordancia con las ideas que en su momento se tenían en el ámbito de la ciencia. Para Faraday los estudios más serios y los que tenían más credibilidad, eran los de la teoría de Ampère, y afirma que “de todas las teorías del electromagnetismo que se han propuesto, la de Ampère es la única que merece ese título” (Romo J, 1991). Sin embargo Faraday encontraba unos desacuerdos con las ideas de Ampère, y era que no aceptaba la hipótesis relacionada con las corrientes alrededor de los polos del imán; y otro desacuerdo que Faraday tenía era que no apoyaba que la fuerza a distancia entre los elementos de corriente fuera el principio básico. Mas sin embargo reconocía que Ampère tenía autoridad en el tema ya que le dio reconocimiento a la acción existente entre la electricidad y el magnetismo, y debido a esto asumía que la teoría de Ampère era la que se ajustaba mejor a la realidad.

Faraday centra su investigación sobre el tema de inducción, y lo hace por medio de un experimento que consta de un anillo de hierro, el cual tiene enrollados en los lados opuestos alambres de cobre como se observa en la figura 3.

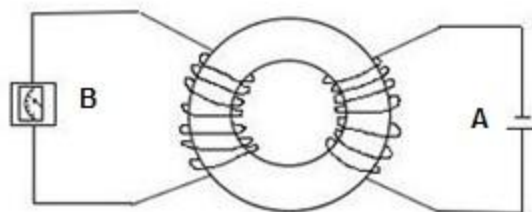


Figura 3. Anillo de hierro con alambres enrollados.

<https://fisica.laguia2000.com/campos/campo-electrostatico/magnetismo-e-induccion-electromagnetica>.

En el experimento los alambres de cobre forman dos circuitos, uno el de la derecha de la figura 3 que se encuentra conectado a una pila de volta, y otro circuito de la izquierda que se encuentra conectado a un galvanómetro. Luego de que Faraday realizara y describiera el montaje argumentó lo siguiente: “A continuación, conectó los extremos de una de las piezas en el lado A con la batería; Inmediatamente un efecto sensible en la aguja osciló y se estableció finalmente en su posición original. Al romper la conexión del lado A con la batería, vuelve a producirse una alteración de la aguja” (Romo. J. 1991). De acuerdo con esta experiencia realizada, Faraday determinó un aspecto relevante del fenómeno. Y es que existen las corrientes de sentidos opuestos ya que al conectar los extremos de las piezas con la batería, la aguja (galvanómetro) oscilaba; y al desconectar la batería se produce también una oscilación (Romo. J. 1991).

A Faraday le causan sorpresa dos cosas del fenómeno, la primera que la corriente sea transitoria y no permanente como él lo pensaba. Y lo otro que le sorprende es la recurrencia del fenómeno, es decir que aparezca una corriente también cuando hay interrupción en la bobina primaria. Faraday recalca que cuando se abre el circuito la aguja imantada sufre una perturbación. Señala también que la interrupción de la primera corriente, y por ende la aparición de la otra corriente en el sentido contrario es una clara señal de que se ha interrumpido un equilibrio.

Aquel equilibrio se da dentro del alambre y lo hace entre la corriente inducida de la bobina

secundaria y un ente que se le opone hasta el punto de detenerla completamente y que se encuentra en dicho circuito. El equilibrio permanece siempre y cuando la corriente fluya en el circuito primario. Cuando la corriente se interrumpe, el equilibrio desaparece y es ahí donde aparece la segunda corriente en dirección contraria. Ese ente que se le opone está relacionado con la idea de estado electro-tónico.

Faraday encontró que era difícil producir un efecto perceptible del estado electro-tónico. Le fue imposible por medio de la experimentación observar un efecto de dicho estado. También investigó cuál podría ser el efecto que generaba el estado electro-tónico en las corrientes permanentes, si causa una aceleración o un retraso en las corrientes y si eso sería debido a las propiedades conductoras del alambre. Cuando el alambre estaba dentro del campo de un imán se encontraba en un estado diferente al habitual, debido a esto dijo que era un estado de la materia. Cuando el alambre se encuentra en ese estado electro-tónico, revela un efecto que se puede determinar experimentalmente. Para Faraday, lograr algún experimento que probara dicho efecto en la materia era de gran importancia, pero fue imposible lograrlo.

Cuando la materia se encuentra afectada por el estado electro-tónico está sufriendo una tensión, y esa tensión es proporcional a la corriente que se induce, luego el estado electro-tónico era interpretado como un estado de tensión que sufría la materia.

Faraday al no poder demostrar los efectos del estado electro-tónico experimentalmente, decide olvidar esa teoría y empieza a trabajar en el concepto de las líneas de fuerza.

La perspectiva geométrica que introduce Faraday para dar una explicación a los fenómenos físicos observados, le permiten hacer una organización del fenómeno a partir de las líneas de fuerza. Por medio de esta organización explicó que el medio en donde están las corrientes es el

estado de tensión por donde se realiza la acción a distancia. De esta manera al tener un alambre y moverlo cerca al polo de un imán de forma que atravesase las líneas del imán, se inducirá una corriente en el alambre. Igualmente sucederá si es el imán el que se mueve en una región cercana al alambre; se inducirá una corriente, con la particularidad que será en dirección opuesta. Con esto se explica la dirección de la corriente inducida que es debida al cruce de las líneas de fuerza.

A partir de esto, la relación entre inducción de corriente y las líneas de fuerza se hace importante. Y es ahí donde llega a una teoría de inducción, y por esto las líneas de fuerza se asumen como un concepto real. La idea del estado electro-tónico no resulta tan apropiada, mientras que la idea de las líneas de fuerza es más acertada ya que muestra el porqué de la dirección de la corriente. Debido a esto, el desarrollo del concepto de líneas de fuerza cobra relevancia y el concepto de estado electro-tónico pierde importancia.

La explicación del fenómeno de inducción se da por medio de las líneas de fuerza de una manera más sencilla y asequible, y es por esto que el autor se deshace del concepto de estado electro-tónico. “Por tanto, a pesar de no haber sustentado completamente su teoría del estado electro-tónico, Faraday mantiene en sus investigaciones la posibilidad de encontrar un experimento que le permita afirmar la existencia de este estado, y aunque sus investigaciones lo llevaron a una gran diversidad de fenómenos, tuvieron gran influencia en otros autores como Maxwell quien materializará las investigaciones de Faraday y desarrollará una teoría electromagnética unificada con una formulación matemática apropiada.” (Ávila Torres S. B. 2013).

Maxwell: La matematización del Potencial Vectorial

La influencia que tuvo Maxwell de Faraday lo llevo a realizar investigaciones que hizo con base en los estudios realizados por Faraday. Él aborda el fenómeno de inducción por medio del concepto de estado electro-tónico. Asume que la inducción es debida a un cambio del estado del

medio, y éste cambio a su vez es generado por la acción magnética; dicha inducción es subordinada por las líneas de fuerza que eran atravesadas por el circuito en donde se inducía la corriente. Dándole así unas características eléctricas y magnéticas al medio en donde se lleva a cabo la interacción.

También hace referencia a la dirección de la fuerza electromotriz, y dice que es debida al cambio del estado del medio por la acción magnética, y con relación a esto escribe lo siguiente: “La fuerza electro-motriz depende del cambio en el número de líneas de acción magnética inductiva que pasan por el circuito. Es natural suponer que una fuerza de este tipo, que depende de un cambio en el número de líneas, se debe a un cambio de estado que se mide por el número de estas líneas. Un conductor cerrado en un campo magnético se supone que puede estar en un cierto estado que surge de la acción magnética. Mientras este estado permanezca inalterado no se produce ningún efecto, pero cuando el estado cambia, surgen fuerzas electro-motrices dependiendo de su intensidad y dirección en este cambio de estado”. (Maxwell J. C. 1965)

De acuerdo con esto, Maxwell tenía la misma interpretación con Faraday en cuanto a que un cambio en el estado del conductor, es el responsable de la corriente inducida, y que llamó estado electro-tónico. Maxwell matematiza la inducción de la corriente formalizando la acción magnética por medio de funciones electro-tónicas denominándolas $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$. Las componentes magnéticas por $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, y la fuerza electromotriz por $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$. Estableciendo una relación entre el estado electro-tónico y la inducción magnética. (Maxwell J.C, 1965).

Maxwell al realizar la formalización del estado electro-tónico deja ver las relaciones que hay entre magnetismo, estado electro-tónico y la fuerza electromotriz. También muestra una diferencia con Faraday en lo que respecta al estado electro-tónico, debido a que Faraday lo asocia con un estado de la materia, mientras que Maxwell lo asocia con un estado del espacio o estado del medio

en el cual se realiza la acción eléctrica y magnética.

La representación vectorial del estado electro-tónico la hace introduciendo las magnitudes F , G , H , que reemplazan a las funciones electro-tónicas α_0 , β_0 , γ_0 . Introduce las magnitudes P , Q , R como las componentes de la fuerza electromotriz de la siguiente forma:

$$P = \frac{dF}{dt} ; Q = \frac{dG}{dt} ; R = \frac{dH}{dt} .$$

Dándole una realidad física al estado electro-tónico, debido a la variación temporal de las componentes de la fuerza electromotriz inducida (Maxwell J.C, 1965).

El estado electro-tónico se le consideró como el origen la fuerza electromotriz, y debido a esto se le atribuye la corriente inducida a él.

Maxwell caracteriza el espacio por medio del estado electro-tónico, y es con esto que logra explicar la interacción en términos de este concepto, el cual decide cambiarle el nombre por momento electromagnético (Maxwell J. C. 1965). Además muestra que la inducción magnética junto con la fuerza electromotriz están ligadas al momento electromagnético, con lo cual se puede afirmar que éste tiene unas características de una magnitud física que tiene efectos que se pueden percibir.

Maxwell le da una nueva definición al momento electromagnético, como Potencial Vectorial \vec{A} , y lo hace mediante las componentes vectoriales del potencial vectorial argumentando que la corriente inducida es producida por el cambio de flujo de la inducción magnética a través de una superficie, la cual está limitada por una curva cerrada (Maxwell J.C. 1873).

“La inducción magnética a través de una superficie delimitada por una curva cerrada depende de la curva cerrada, y no de la forma de la superficie que está delimitada por ella, debe ser posible

determinar la inducción a través de una curva cerrada por un proceso que depende únicamente de la naturaleza de dicha curva, y que no implica la construcción de una superficie que forma un diafragma de la curva. Esto puede hacerse encontrando un vector \vec{A} relacionado con \vec{B} , la inducción magnética, de tal manera que la integral de línea de \vec{A} , extendida alrededor de la curva cerrada, sea igual a la integral superficial de \vec{B} , extendida sobre una superficie delimitada por la curva cerrada” (Maxwell J. C. 1873).

El potencial vectorial es la formalización del estado electro-tónico; debido a esto, dicho potencial es en esencia el que origina el desarrollo de la teoría electromagnética de Maxwell, a través de la relación:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B}.$$

Para especificar completamente un campo vectorial es necesario que se den sus componentes (Plonus M. A. 1992), entonces se debe especificar también la divergencia de \vec{A} , $(\nabla \cdot \vec{A})$. Debido a que $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, no se requiere que $\nabla \cdot \vec{A}$ se especifique de una manera particular, entonces por simplicidad se escoge

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0,$$

que se denomina una calibración (gauge de Coulomb).

En el tratado de Maxwell (Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 1873) define el potencial así: “El vector \vec{A} representa en dirección y magnitud la integridad en el tiempo de la fuerza electromotriz que una partícula situada en el punto x, y, z experimentaría si la corriente primaria se detuviera repentinamente. Por lo tanto, lo llamaremos Momento Electrocinético en el punto x, y, z. Es idéntica a la cantidad que investigamos bajo el nombre de vector-potencial de

inducción magnética.” (Maxwell. J. C. 1873).

Por medio de la ecuación $\nabla \times \vec{A} = \vec{B}$ Maxwell obtiene la relación entre el potencial vectorial y el flujo magnético así (Rozo C. M, Ávila T. S, Walteros. A, 2015):

$$\oint_l \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int_s \nabla \times \vec{A} \cdot d\vec{s} = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = \Phi_B,$$

siendo Φ_B el flujo de la inducción magnética a través de la superficie (s) limitada por la curva (l). Así el flujo magnético expresado en términos del potencial vectorial será la integral de línea a lo largo de la curva (l):

$$\oint_l \vec{A} \cdot d\vec{l} = \Phi_B.$$

Maxwell estableció que el campo es el medio en donde se realizan las acciones de los cuerpos en los cuales no se evidencian cambios de naturaleza mecánica sino de naturaleza eléctrica o magnética. Es así como introduce el concepto de potencial vectorial, concepto que utiliza para dar forma a la teoría electromagnética y también a las cuatro ecuaciones conocidas como “las ecuaciones de Maxwell” (Rozo C. M, Ávila T. S, Walteros. A, 2015).

Capítulo 3

El potencial vectorial: una mirada desde el contexto de la mecánica cuántica

En electromagnetismo las fuerzas están íntimamente relacionadas con los campos eléctrico y magnético, debido a esto los campos toman un carácter de suma importancia ya que para hallar la fuerza electromagnética se deben conocer dichos campos. La relación que existe entre estas magnitudes se conoce con el nombre de fuerza de Lorentz. Dicha fuerza se ejerce sobre una partícula y es producida por los campos eléctrico (\vec{E}) y magnético (\vec{B}), y viene descrita por la siguiente ecuación:

$$\vec{F} = q [\vec{E} + \vec{v}(t) \times \vec{B}],$$

siendo \vec{F} la fuerza ejercida sobre la carga, q la carga asociada a la partícula y $\vec{v}(t) = \frac{dx}{dt}$ su velocidad. Los campos \vec{E} y \vec{B} juegan un rol importante ya que a partir de ellos se determina el comportamiento de las partículas cargadas.

Sobre el potencial vectorial

Existe un concepto que tiene que ver con el potencial vectorial, el cual se conoce con el nombre de “efecto Aharonov-Bohm”, que muestra el comportamiento de los electrones cuando se encuentran alrededor de un solenoide por donde se hace circular una corriente. Cuando la corriente empieza a fluir por el solenoide se crea un campo magnético en el interior de éste. Si el solenoide se hace lo suficientemente largo en comparación con su radio, el campo magnético que se genera solo existirá en el interior y no en el exterior del solenoide.

De esta manera, los electrones transitarán por el exterior del solenoide, lugar en donde no existirá un campo magnético que afecte su movimiento. Sin embargo esto no sucede así y los electrones al desplazarse cerca del solenoide son influenciados por “algo” y su desplazamiento se

ve alterado. Ese “algo” es el potencial vectorial \vec{A} (Figura 4), el cual es el responsable de que los electrones tengan un comportamiento diferente.

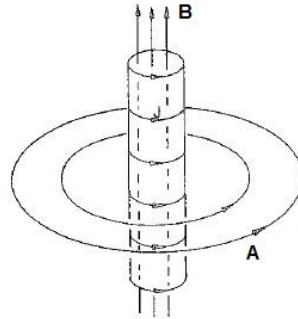


Figura 4. Campo magnético en el interior del solenoide, y potencial vectorial por fuera. (Feynman R. P. 1963).

Existen situaciones en donde se tiene un haz de electrones que circula por la parte exterior de un solenoide (figura 5) en donde el campo magnético no existe y solamente está presente el potencial vectorial \vec{A} ; en dicho caso los electrones sienten una influencia sobre su movimiento y si los electrones se hace chocar sobre una pantalla se puede observar que se genera un patrón de interferencia.

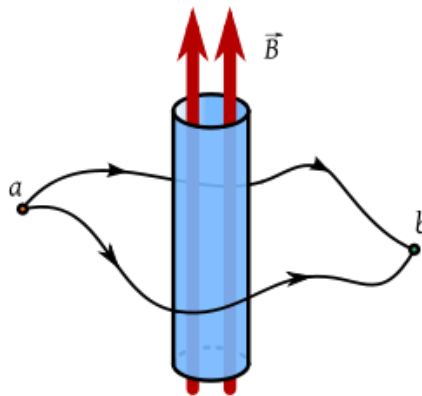


Figura 5. Haz de electrones rodeando un solenoide. (https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Aharonov-Bohm).

Fueron los físicos Yaki Aharonov (Israel) y David Joseph Bohm (EE.UU.) los que predijeron

el comportamiento de los electrones en dicha situación y también los que vieron la importancia, y la realidad física que tiene en el potencial vectorial \vec{A} .

Aharonov y Bohm propusieron unos experimentos en 1959 en un artículo (THE PHYSICAL REVIEW “Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory”) en donde se observaba la naturaleza física del potencial vectorial \vec{A} por medio del fenómeno de interferencia, con lo cual se encuentra que la mecánica cuántica está implícita en dicha situación.

Allí se puede observar que el patrón de interferencia que resulta al difractar un haz de electrones que a su vez atraviesa un obstáculo con una doble rendija, es desplazado por un campo vectorial entre las rendijas siendo el campo magnético cero por donde transitan los electrones después de ser difractados. En el artículo se observa que esto se puede lograr con una configuración de un solenoide de dimensiones microscópicas (por ejemplo separación de los haces de electrones hasta en 0.8 mm), por donde se hace circular una corriente estacionaria, con lo cual se generaría un flujo ϕ .

$$\phi = \int \vec{H} \cdot d\vec{s} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}.$$

El flujo magnético por fuera del solenoide es cero, y el potencial vectorial aparece alrededor del solenoide. En la propuesta por Aharonov y Bohm se observa que el campo magnético es cero por donde transitan los electrones y debido a esto, la fuerza de Lorentz en la trayectoria del haz de electrones no existe. Con lo cual se observa que el potencial vectorial \vec{A} implica una naturaleza cuántica debido a que es el responsable de la diferencia de fase que existe entre los dos haces de electrones; diferencia que hace que aparezca un patrón de interferencia.

El artículo menciona tres propuestas experimentales en donde el concepto de potencial vectorial

es el eje fundamental. Las dos primeras propuestas, los científicos únicamente las mencionan de una manera informativa. El artículo centra su atención en la tercera propuesta experimental, en donde se dan bases sólidas sobre la naturaleza física y real que tiene el potencial vectorial.

Dicha propuesta (Figura 6) consiste en una corriente que fluye por un solenoide de radio R . Al circular la corriente se crea un campo magnético H en el interior del solenoide, y por fuera aparece el potencial vectorial \vec{A} .

El flujo del campo magnético es

$$\phi_0 = \int \vec{H} \cdot d\vec{s} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{x}.$$

En este experimento un haz de electrones es enviado a una doble rendija en donde detrás de ésta se encuentra un solenoide, el cual es protegido de dicho haz.

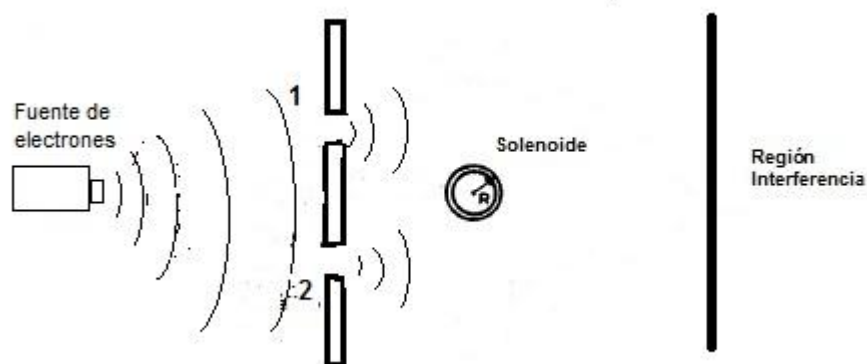


Figura 6. Esquema de propuesta No 3 de Aharonov-Bohm. (Aharonov. Y. y Bohm D. (1959). THE PHYSICAL REVIEW.

Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory. Second Series, Vol. 115, No. 3.)

Para este experimento el Hamiltoniano es

$$H = \frac{[P - (e/c) \vec{A}]^2}{2m}$$

La función de onda está dividida en dos partes $\psi = \psi_1 + \psi_2$, en donde ψ_1 es la función de onda del haz que pasa por un lado de solenoide y ψ_2 es la del lado opuesto. Sus respectivas soluciones son

$$\psi_1 = \psi_1^0 e^{-iS_1/\hbar}, \quad \psi_2 = \psi_2^0 e^{-iS_2/\hbar},$$

siendo S_1 y S_2 son las fases de los electrones a lo largo de los caminos uno y dos (partes B y C de la figura 6). Estas fases obedecen a la siguiente ley: *“La fase de la amplitud de llegar por una trayectoria cualquiera es afectada por la presencia de un campo magnético en una cantidad que es igual a la integral del potencial vectorial a lo largo de toda la trayectoria por la carga de la partícula dividida por la constante de Planck”* (Feynman R. P. 1963).

$$\Delta S = \frac{e}{\hbar} \int \vec{A} \, dx.$$

Al tener dos fases, y al ser afectadas como lo dice la ley anterior, existe una diferencia en dichas fases que se escribe en términos del potencial vectorial así:

La fase del haz de electrones que atraviesa por 1 es:

$$S_1 = S_1(B = 0) + \Delta S_1.$$

$$S_1 = S_1(B = 0) + \frac{e}{\hbar} \int_1 \vec{A} \, dx.$$

La fase del haz de electrones que atraviesa por 2 es:

$$S_2 = S_2(B = 0) + \Delta S_2.$$

$$S_2 = S_2(B = 0) + \frac{e}{\hbar} \int_2 \vec{A} \, dx.$$

Como la interferencia de las ondas se presenta cuando existe una diferencia de fase, entonces la interferencia de los haces de electrones que van por las trayectorias 1 y 2 será debida a la diferencia de sus fases así:

$$(S_1 - S_2) = S_1 (B = 0) + \frac{e}{\hbar} \int_1 \vec{A} dx - \left(S_2 (B = 0) + \frac{e}{\hbar} \int_2 \vec{A} dx \right)$$

$$(S_1 - S_2) = S_1 (B = 0) - S_2 (B = 0) + \frac{e}{\hbar} \int_1 \vec{A} dx - \frac{e}{\hbar} \int_2 \vec{A} dx .$$

Estas dos integrales se pueden simplificar,

$$\frac{e}{\hbar} \oint_{(1-2)} \vec{A} dx = \frac{e}{\hbar} \int_1 \vec{A} dx - \frac{e}{\hbar} \int_2 \vec{A} dx .$$

La diferencia de fases queda:

$$(S_1 - S_2) = (S_1 - S_2) (B = 0) + \frac{e}{\hbar} \oint_{(1-2)} \vec{A} dx .$$

La última integral es la simplificación de las dos integrales, una que va primero por (1) y regresa luego por (2); y también cabe aclarar que $[(S_1 - S_2) (B = 0)]$ es la diferencia de fases sin campo magnético.

Entonces aparece un patrón de interferencia que es generado por la diferencia de fase

$$(S_1 - S_2) = (S_1 - S_2) (B = 0) + \frac{e}{\hbar} \int \vec{A} dx .$$

Esta ecuación es la que determina la nueva posición de los máximos y los mínimos del patrón de interferencia.

Cuando se realiza el experimento propuesto por Aharonov y Bohm sin que por la bobina circule corriente, aparece un patrón de interferencia como se muestra en la figura 7a. Ahora, si se hace circular corriente por el solenoide, existirá un campo magnético en el interior de la bobina y un potencial vectorial en el exterior de esta, en cuanto al patrón de interferencia que se genera se observa que ha sufrido un corrimiento (figura 7b) hacia una nueva posición, con respecto al patrón de interferencia que se genera sin estar presente el solenoide. Comportamiento que depende únicamente del potencial vectorial.

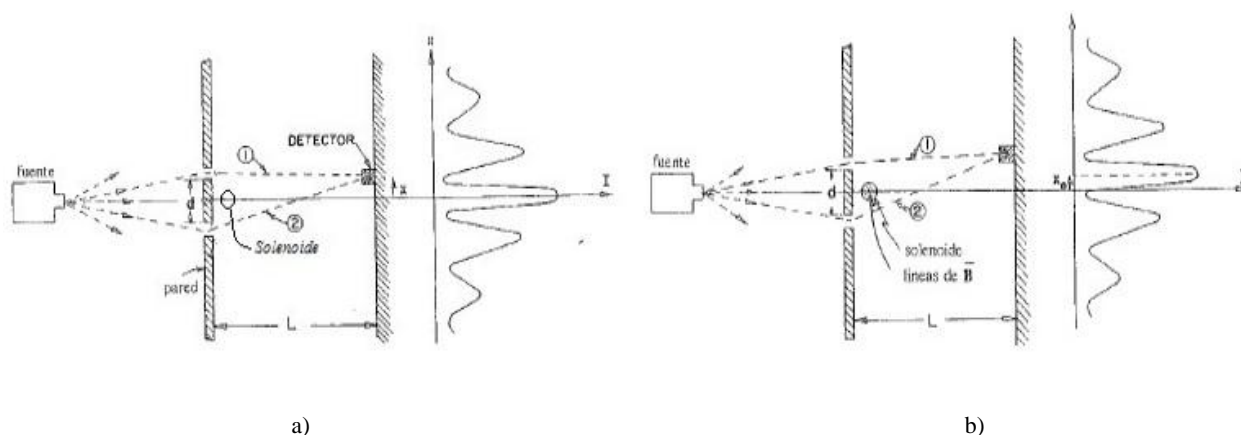


Figura 7. Comparación del patrón de interferencia, a) solenoide apagado y b) solenoide prendido.

(Feynman R. P. 1963).

El corrimiento del patrón de interferencia en la pantalla muestra la naturaleza física del potencial vectorial, el cual influye sobre la fase de los electrones.

El potencial vectorial produce cambios físicos evidentes en partículas elementales como los electrones, lo cual da las bases para poder afirmar que el potencial vectorial tiene una naturaleza física, y no es solamente un ente puramente matemático como se pensaba. La física cuántica nos brinda una herramienta para mostrar que el concepto de potencial vectorial tiene una naturaleza física.

La demostración experimental del potencial vectorial como un campo vectorial físico la realizó

Robert G (Bob) Chambers, un distinguido físico que estudió en Cambridge y terminó su doctorado en 1951. Fue una figura importante en la Universidad de Bristol; realizó el experimento propuesto por Aharonov y Bohm un año después de haberse publicado el artículo. El experimento lo realizó en la Universidad de Bristol en donde trabajaba, en el año 1960. A Bob Chambers le fue otorgada la medalla Royal Hughes por haber realizado este experimento.

Dicho experimento es extremadamente difícil de realizar, debido a las condiciones microscópicas que se necesitan para llevarlo a cabo. Para el solenoide se utilizaron “whiskers” que son cristales de hierro o filamentos de hierro que al ser imantados crean campos magnéticos igual que un solenoide. Las dimensiones de estos filamentos de hierro son microscópicas, del orden de micras. La realización del experimento se llevó a cabo con estos filamentos entre las rendijas, arrojando el desplazamiento del patrón de interferencia que se había predicho.

Queda claro que la propuesta de Aharonov y Bohm del haz de electrones circulando por una región en donde el campo magnético es prácticamente nulo, es acertada. La realización del experimento que hizo Bob Chambers, demostró la naturaleza física que tiene el potencial vectorial; demostración que tiene como eje fundamental la actividad experimental como agente de construcción de conocimiento y formalización de los procesos de aprendizaje. Dicha actividad se muestra como un proceso en donde se establece una relación bastante estrecha entre la construcción de fenomenologías y la teorización.

La fenomenología se aborda con la estructuración de los experimentos que fundamentaron la concepción del potencial vectorial, como los experimentos abordados en el capítulo 2 para la formalización del concepto como tal; y el experimento de este capítulo que sirve de sustento para reafirmar que el potencial vectorial tiene una naturaleza física y que no es solamente un ente matemático conveniente para realizar cálculos. Así las cosas el proceso de formalización de los

conceptos en la ciencia se ve influenciado totalmente por el experimento como se observa en este trabajo de grado.

El concepto de potencial vectorial en la teoría clásica se toma como una herramienta matemática, pero en el contexto de la mecánica cuántica el potencial vectorial se evidencia que tiene una naturaleza física, y dicha evidencia esta sustentada por medio de la actividad experimental, con lo cual se puede abstraer que dicho concepto sea más fácil de comprender por parte de los estudiantes.

Conclusiones

- Los pensadores que estructuraron el concepto de potencial vectorial lo hicieron tomando como eje fundamental la actividad experimental, pues fue con base en los fenómenos observados al realizar los experimentos que se dieron las explicaciones de dichos fenómenos.
- El concepto de Estado electro-tónico es el que permite determinar la característica del espacio que está influenciada por una corriente eléctrica y un campo magnético. Éste concepto es fundamental para determinar la teoría electromagnética clásica de Maxwell, donde el papel del potencial vectorial es importante.
- El concepto de potencial vectorial que se menciona en este trabajo, es el concepto que Faraday menciona como estado electro-tónico, y que posteriormente Maxwell desarrollaría hasta darle una formalización y una estructuración matemática, y luego utilizaría para dar forma a las leyes de Maxwell.
- En electromagnetismo clásico el potencial vectorial no tiene significado físico debido a que la ecuación de movimiento involucra solo los campos magnético y eléctrico. Debido a esto el potencial se considera como un auxiliar puramente matemático para resolver problemas del electromagnetismo. Por el contrario los campos eléctrico y magnético son de naturaleza física.
- El potencial vectorial se considera como un campo vectorial físico, debido a que genera efectos perceptibles en las partículas aun cuando el campo magnético sea nulo. Esto significa que el potencial tiene un significado más general; debido a esto debe ser considerado como físicamente efectivo.
- En física cuántica una partícula puede ser influenciada por el potencial vectorial, inclusive

si dicha partícula se encuentra en una región en donde el campo magnético es cero. Esto quiere decir que las propiedades físicas de un sistema quedan totalmente determinadas por los potenciales en lugares en donde el campo magnético es prácticamente nulo.

Bibliografía

Aharonov. Y. y Bohm D. (1959). THE PHYSICAL REVIEW. Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory. Second Series, Vol. 115, No. 3.

Bob Chambers, (1924-2016) <http://www.bristol.ac.uk/news/2017/january/bob-chambers.html>

Colciencias. (2016), presupuesto anual Colciencias. Recuperado de: http://www.colciencias.gov.co/colciencias/informacion_financiera_contable/ejecucion

Faraday, M. (1821/1822). *Historical Sketch of Electro-magnetism*, Annals of Philosophy..

Faraday, M, (1831-1855) Experimental Researches in Electricity, 3 Vols.

Feynman R. P. y Leighton R.B. (1963). *The Feynman Lectures on Physics*. Vol. I y II. California Institute of Technology y Matthew Sands. Stanford University.

Gilbert, W, 1600, *The Magnete*, Londres Inglaterra. Recuperado de www.new-science-theory.com.

Greca. I. M. y Herscovitz E. V. Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. Instituto de Física, Universidad Federal do Rio Grande do Sul.

José Romo Feíto. (1991). El concepto de estado electro-tónico en Faraday. Universidad de Barcelona. Barcelona España.

Luis A. Montero Cabrera y Lourdes A. Díaz, (2003). Universidad de La Habana, Cuba recuperado de: http://karin.fq.uh.cu/fqt/fqt_archivos/superpos_estados.pdf

Lewis H. R. (1996). Quantum Field Theory. Second edition. Cambridge Inglaterra.

Malagón. S. F. Sandoval. O. S. Ayala. M. M. M. (2013). LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL: CONSTRUCCIÓN DE FENOMENOLOGÍAS Y PROCESOS DE FORMALIZACIÓN. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá Colombia.

Martin A. Plonus. Electromagnetismo Aplicado. Editorial Reverté S.A. (1992)

Maxwell J. C. (1873). A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. I y II. Oxford. Reino Unido.

Maxwell J. C. (1864). A Dinamical Theory of the Electromagnetic Fiel.

Maxwell J. C. (1965) The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, Vol. I. Canada.

Moreira, M. (2002). MODELOS MENTALES Y MODELOS CONCEPTUALES Publicado en la Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, Porto Alegre.

Moreira. M. A. y Greca. I. M. Obstáculos Representacionales Mentales en el Aprendizaje de Conceptos Cuánticos. Instituto de Física da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Mostafa E. El Demery. (2013). New Perspectives on the Aharonov-Bohm Effect. St Edmund`s College. Cambridge Inglaterra.

Oliver Orasch. (2014). The Aharonov-Bohm-Effect. Universidad de Graz. Estiria Austria.

Pérez, G. (1986). ANALISIS CRITICO DE LA INTRODUCCION DE LA FISICA MODERNA EN LA ENSEÑANZA MEDIA, revista de enseñanza de la física. Recuperado de: <http://roderic.uv.es/handle/10550/44206>

Pérez, G. (1986). Física moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados revista de enseñanza de la física. Recuperado de: <http://roderic.uv.es/handle/10550/44250>

Rozo C. M. Ávila T. S. Walteros. A. (2015). Sobre el estado electro-tónico y su interpretación: El Potencial Vectorial. Revista Científica. Distrital Francisco José de Caldas.

Sinarcas, V. (2013). DIFICULTADES EN EL APRENDIZAJE Y LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA CUÁNTICA EN EL BACHILLERATO, ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS Revista de investigación y experiencias didácticas, Núm. 31.3 (2013): 9-25, recuperado de: <http://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/285801>

Socorro. E (2013). Dificultades en el proceso enseñanza aprendizaje de la Física. Revista Presencia Universitaria, Año 3, Enero – Junio. Recuperado de: http://eprints.uanl.mx/3368/1/Dificultades_en_el_proceso_ense%C3%B1anza_aprendizaje_de_la_F%C3%ADsica.pdf

Sepúlveda A. S. (2008). Electromagnetismo. Medellín Colombia.

Sandra Bibiana Ávila Torres. (2013). Sobre La Naturaleza del Potencial Vectorial, su Sentido y Significado. Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá Colombia.