



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL

Educadora de educadores

Análisis histórico de los modelos del ferromagnetismo en los siglos XIX y XX

Edwin johan Ortiz Riaño

Universidad Pedagógica Nacional de Colombia
Facultad de Ciencia y Tecnológica, Departamento Física
Bogotá, Colombia
2016

Análisis histórico de los modelos del ferromagnetismo en los siglos XIX y XX

Edwin johan Ortiz Riaño

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Licenciado en Física

Director(a):
Licenciado en Física Yesid Javier Cruz Bonilla

Línea de Investigación:
La enseñanza de la física a través de la relación física matemática

Universidad Pedagógica Nacional de Colombia
Facultad de Ciencia y Tecnología, Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2016

Dedico este trabajo

A mis padres quienes siempre me han apoyado y me han brindado su cariño, comprensión y ejemplo.

A mis amigos con los cuales puedo charlar sobre temas tan interesantes como lo es la ciencia.

La ciencia natural, no se limita a describir y explicar la naturaleza, sino que es parte de la interacción entre la naturaleza y nosotros mismos.

Werner Heisenberg

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres puesto que ellos hicieron que yo fuera quien soy e el presente. Una parte muy importante de mis logros, especialmente éste, se los debo a ustedes. Mientras me inculcaron los valores de responsabilidad y deber, me dieron algunas libertades. Pero lo mas importante fue la motivación que constantemente me dieron para lograr mis metas.

Gracias madre y padre.

RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN-RAE.

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de Grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Titulo del documento	Análisis histórico de los modelos del ferromagnetismo en los siglos XIX y XX.
Autor(es)	Ortiz Riaño, Edwin Johan
Director	Cruz Bonilla Yesid Javier
Pubilcación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2016. 90.p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional.
Palabras Claves	PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LA MATERIA, FERROMAGNETISMO, DOMINIOS MAGNÉTICOS, ANÁLISIS HISTÓRICO, CAMPO MOLECULAR, SPIN, INTERACCIÓN DE CANJE, TEXTOS ORIGINALES, CORRIENTES DE MAGNETIZACIÓN, LEY DE CURIE, MECÁNICA CUÁNTICA, INTERACCIÓN ENTRE MOLÉCULAS.

2. Descripción
Se realiza un análisis histórico de los diferentes modelos desarrollados en torno al fenómeno de ferromagnetismo durante el siglo XIX y primera mitad del siglo XX, haciendo uso de algunos textos originales de los autores más influyentes en la explicación de las principales características mostradas por los materiales ferromagnéticos. Este trabajo de grado aborda áreas de interés para estudiantes de física y de carreras a fines que involucre la asignatura de electromagnetismo, estas áreas son: la explicación de algunos conceptos teóricos del ferromagnetismo, la reconstrucción histórica del fenómeno a lo largo de los siglos XIX y XX Y la descripción de algunos experimentos que fueron realizados en dicho periodo de tiempo que arrojaron resultados importantes para la explicación de fenómeno. El contenido general del texto va dirigido a mostrar las diferentes hipótesis que surgieron alrededor del ferromagnetismo hasta llegar a las teorías que explicaron el fenómeno y mostraron su naturaleza.

3. Fuentes

Para el trabajo de grado se tuvo presente trabajos de grado previos entorno a la descripción del magnetismo en la materia y en particular del fenómeno del ferromagnetismo. Los trabajos encontrados fueron los siguientes:

1. Peña, M. (2003). Validez del principio de exclusión de Pauli en la interpretación y explicación cuántica del ferromagnetismo. Universidad Pedagógica Nacional.
2. Torres, Y., Cuellar, L. (2012). el estudio de las propiedades magnéticas de la materiales desde un enfoque experimental como contribución a la alfabetización científica. Universidad Pedagógica Nacional.
3. Reyes, M. (2010). Estudio de la respuesta ferróica en compósitos $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_3$. Universidad Nacional de Colombia.

También se usaron textos originales con el propósito de enriquecer el análisis histórico de los cuales cabe resaltar los siguientes:

1. Faraday, M. (1846). On the magnetic affection of light and on the distinction between the ferromagnetic and diamagnetic conditions of matter. *Philosophical Magazine*, 3 (41), 249-258.
2. Ewing, J. (1890). Contributions to the molecular theory of induced magnetism. *Royal Society*, 48 (13), 342-458.
3. Weiss, P. (1907). L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. *Annales de physique*, 6 (1), 661-690.
4. Heisenberg, W. (1928). Zur Theorie des Ferromagnetismus. *Zeitschrift für Physik*, 49, 619-636.

Finalmente se consulto bibliografía entorno al ferromagnetismo en temas referentes a los dominios magnéticos, interacción de canje, corrientes de magnetización entre otros más, cabe resaltar las siguientes referencias:

1. Feynman, R & Leighton, R & Sands, M. (1988). *Lecturas de feynman: electromagnetismo y materia*. México: Addison Wesley Longman.
2. Hlawiczka, P. (1977). *Introducción a la electrónica cuántica*. España: Editorial reverté.
3. Chikazumi, S. (1997). *Physics of Ferromagnetism*. New York: OXPORD UNIVERSITY PRESS.

4. Contenido

El trabajo se divide en 3 capítulos.

El primero capítulo titulado *Conceptos teóricos del Ferromagnetismo* en el cual se muestran los conceptos físicos y matemáticos necesarios para descripción del ferromagnetismo.

El segundo capítulo titulado *El Ferromagnetismo en el siglo XIX* presenta los desarrollos realizados en la explicación del fenómeno en el siglo XIX.

En el tercer capítulo titulado *El Ferromagnetismo en el siglo XX* presenta los desarrollos realizados en la explicación del fenómeno en el siglo XX.

5. Metodología

El presente trabajo, se realizó haciendo uso de la metodología descriptiva: los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis (Dankhe, 1986). Como se realizó un análisis histórico, se fue describiendo, los autores involucrados y sus aportes a la teoría, de igual manera las condiciones en que fue creada la teoría y las preguntas que respondió. En relación con el enfoque histórico, se utilizaron algunos textos originales desarrollados en torno al fenómeno del ferromagnetismo.

Se propuso dividir la investigación en 4 momentos, con objetivo de tener presente las diferentes tareas que se debían desarrollar en la investigación, esto ayudó en gran manera a tener claridad sobre el avance de la investigación así también como de los alcances que se fueron logrando y el tiempo que se necesitó para lograr los objetivos planteados. Los momentos de investigación fueron:

1. Primer momento recopilación de información. En este momento de la investigación, se buscó todas las referencias bibliográficas necesarias para el desarrollo del trabajo. De igual manera, todos los antecedentes relacionados con el tema, que permitieron una complementación importante para la investigación.
2. Segundo momento interpretación y construcción histórica. En este momento de la investigación, se interpretó y analizó la información encontrada, con el fin de realizar la reconstrucción y descripción histórica del fenómeno, en los siglos XIX y XX, teniendo en cuenta los autores involucrados y las preguntas que se tenían respecto al ferromagnetismo.
3. Tercer momento explicación matemática del ferromagnetismo. En este momento de la investigación, se mostraron algunos de los conceptos matemáticos involucrados en el fenómeno del ferromagnetismo, desde los desarrollados bajo la física clásica hasta los de origen cuántico.
4. Cuarto momento explicación de diferencias del ferromagnetismo del diamagnetismo y paramagnetismo. En este momento de la investigación, se evidenció de una forma muy breve en que consiste el diamagnetismo y paramagnetismo, y cuáles son las diferencias que tienen estos fenómenos, respecto al fenómeno del ferromagnetismo.

6. Conclusiones

1. Conclusiones de tipo teórico.

- Con el establecimiento de su teoría electrodinámica, Ampère estableció una primera hipótesis sobre la magnetización en los materiales ferromagnéticos, que involucraba conceptos moleculares tales como las corrientes amperianas las cuales eran las responsables de dicha magnetización.
- Ewing logró cambiar la forma como se estudiaban los fenómenos magnéticos, apuntando a las interacciones cooperativas entre moléculas como la pieza clave en las propiedades magnéticas de la materia.
- Curie, mostró que el ferromagnetismo y el paramagnetismo están relacionados, estableciendo una transición de fase entre estas dos clases de magnetismo. Esto permitió entender que el paramagnetismo depende de condiciones termodinámicas, que impide que haya un ordenamiento que favorezca al magnetismo de estos materiales.
- Los experimentos que realizó Weiss, le permitieron dar cuenta de la anisotropía de los materiales ferromagnéticos.
- Heisenberg en el establecimiento de su teoría, logró mostrar que el ferromagnetismo es un fenómeno, el cual, su explicación se obtiene desde la mecánica cuántica.

2. Reflexiones pedagógicas y aportes de trabajo.

Algo importante de resaltar, es que el análisis de textos originales tuvo una rica utilidad para la descripción histórica, debido a que permitió la reconstrucción de antiguas ideas y como dichas ideas se fueron transformando en otras ideas cada vez más refinadas. De igual manera, permitieron identificar en dónde los autores encontraron problemas al construir conceptos y leyes en torno al ferromagnetismo, y cómo enfrentaron dichos problemas para tratar de encontrar una solución. Por otra parte, permitieron analizar cómo los diferentes autores concebían el ferromagnetismo y en qué herramientas matemáticas, teóricas o epistemológicas se basaron para desarrollar sus trabajos. Con todo esto, fue posible realizar la reconstrucción histórica en los siglos XIX y XX.

Todo lo dicho anteriormente, tiene una gran ventaja en la enseñanza debido a que permite que los estudiantes conozcan un poco más a fondo los procesos de organización y de experimentación que se realizaron, alrededor del ferromagnetismo, y los contextos sociales en los que se desarrolló. Por otro lado, la historia también ayuda a mejorar la comprensión de los conceptos y las teorías físicas, recrear algunas situaciones y vivencias en relación con una teoría específica y ayuda a promover un entendimiento de las relaciones entre ciencia, cultura y sociedad. Todas estas características, actúan positivamente en comprender mejor una teoría física, en nuestro caso, hace que se entienda un poco más cómo fue el desarrollo de la teoría del ferromagnetismo.

Elaborado por:	Edwin Johan Ortiz Riaño
Revisado por:	Yesid Javier Cruz Bonilla

Fecha de elaboración del Resumen:	29	08	2016
--	----	----	------

Lista de Figuras

1-1.	<i>un electroimán que tiene una parte en punta y la otra parte es plana. el campo magnético es mas intenso en la parte en punta.</i>	6
1-2.	<i>el polo en punta repele débilmente el pequeño cilindro de bismuto</i>	6
1-3.	<i>el polo en punta atrae débilmente el pequeño cilindro de aluminio</i>	7
1-4.	<i>el polo en punta atrae fuertemente el pequeño cilindro de hierro</i>	8
1-5.	<i>modelo de corrientes de ampere, donde hay una magnetización neta a lo largo del eje del cilindro.</i>	8
1-6.	<i>las corrientes dentro de un material uniformemente magnetizado se cancelan permaneciendo solo una corriente superficial. Independiente de la forma que tenga las espiras.</i>	9
1-7.	<i>orientación ordenada de los momentos magnéticos atómicos, cada flecha representa la orientación de cada momento magnético.</i>	10
1-8.	<i>distribución de dominios magnéticos en una muestra de hierro.</i>	10
1-9.	<i>magnetización del hierro en función de la temperatura.</i>	11
1-10.	<i>dominios magnéticos.</i>	14
1-11.	<i>el espacio en donde ocurre la transición de un dominio a otro se conoce como pared de Bloch.</i>	15
1-12.	<i>Magnetización de un material ferromagnético.</i>	18
1-13.	<i>Magnetización de un material ferromagnético.</i>	18
2-1.	<i>Famoso experimento de Oersted representado frente a la audiencia, la cual muestra que una corriente eléctrica puede generar magnetismo.</i>	24
2-2.	<i>André-Marie Ampère.</i>	25
2-3.	<i>fluído eléctrico atravesando un átomo.</i>	27
2-4.	<i>Imanes moleculares de Weber distribuidos aleatoriamente.</i>	32
2-5.	<i>pivote construido por Ewing para su experimento. tomada de Ewing, J.(1890), contributions to the molecular theory of induced magnetism.[figura.1]. . .</i>	34
2-6.	<i>Curva de magnetización para materiales ferromagnéticos realizada por Ewing. tomada de Ewing, J.(1890), contributions to the molecular theory of induced magnetism.[figura.3].</i>	35
2-7.	<i>Influencia de una fuerza magnética cuando se está cerca de la saturación. tomada de Ewing, J.(1890), contributions to the molecular theory of induced magnetism.[figura.6].</i>	35
3-1.	<i>arreglo experimental de Weiss para el estudio de la magnetización de la pirrotina. tomada de Weiss, P.(1898), l'aimantation plane de la pyrrhotine.</i>	41
B-1.	<i>momentos magnéticos ordenados aleatoriamente en un volumen Δv. . . .</i>	61

D-1. <i>partícula eléctrica orbitario, con momento magnético μ y momento angular</i>	
<i>L.</i>	67

Lista de Tablas

1-1. Materiales ferromagnéticos mas intensos	11
2-1. Diferencias entre las ideas de Ampère y Faraday.	29

Índice General

Agradecimientos	VII
RAE	IX
Lista de Figuras	XVI
Lista de Tablas	XVII
Introducción	1
1. Conceptos teóricos del Ferromagnetismo.	5
1.1. Modelo clásico	5
1.1.1. Clasificación de los materiales magnéticos.	5
1.1.2. Corrientes de magnetización.	8
1.1.3. Dominios magnéticos.	9
1.1.4. Punto y ley de Curie.	10
1.1.5. Ley de Curie-Weiss y campo medio.	12
1.2. Modelo cuántico	13
1.2.1. Interacción de canje.	13
1.2.2. Energía de anisotropía.	14
1.2.3. Paredes de Bloch.	15
1.2.4. Histéresis magnética.	17
2. El Ferromagnetismo en el siglo XIX.	21
2.1. Primeras clasificaciones magnéticas de la materia.	21
2.2. Primera hipótesis sobre el ferromagnetismo.	23
2.2.1. El descubrimiento de Oersted.	23
2.2.2. El nacimiento de la electrodinámica.	24
2.2.3. Explicación de Ampère del ferromagnetismo.	26
2.3. Concepción del magnetismo en Faraday y Ampère.	27
2.4. Las ideas ingeniosas de Faraday.	29
2.5. Nuevas hipótesis sobre el ferromagnetismo.	31
2.6. Curie y sus clasificaciones magnéticas.	36
3. El Ferromagnetismo en el siglo XX.	39
3.1. Explicación teórica de Langevin	39
3.2. Teoría del Ferromagnetismo de Weiss	40
3.2.1. Los experimentos de Weiss	40
3.2.2. El campo molecular	42

3.2.3. Los dominios magnéticos y la magnetización espontanea	43
3.2.4. Problema de la teoría: El origen del campo molecular	45
3.3. Teoría del ferromagnetismo de Heisenberg	45
3.3.1. La nueva mecánica cuántica y el magnetismo	46
3.3.2. Discusiones sobre magnetismo de Heisenberg y Pauli	47
3.3.3. La interacción de canje en el ferromagnetismo	48
3.3.4. Limitaciones de la teoría	50
Conclusiones	53
Bibliografía	57
A. Anexo: Susceptibilidad y permeabilidad magnética.	59
B. Anexo: Magnetización en materiales.	61
C. Anexo: Modelo atómico de Bohr.	63
D. Anexo: Momento magnético orbital.	67
E. Anexo: Spin y momento magnético del electrón.	69

Introducción

Sobre el problema de Investigación

El experimento tiene una estrecha relación con las construcciones conceptuales, donde hay un doble movimiento de elaboración teórica e interpretación donde juntos se modifican e interactúan mutuamente (Malagón, 2012). En este sentido, cuando se observan algunas experiencias, como por ejemplo la atracción que un imán ejerce sobre un tubo de hierro, sin contar con las bases teóricas necesarias, se generan dificultades en los estudiantes por encontrar una respuesta que sea coherente con lo que se observa.

La dificultad que presentan los estudiantes en hallar relaciones entre conceptos o en muchos casos en interpretar físicamente los mismos, en temas relacionados con el electromagnetismo, es un problema que los profesores deben enfrentar en el desarrollo de estos cursos. Por ello, se hace necesario que usen diferentes métodos pedagógicos para enfrentar e intentar resolver dicha dificultad, métodos que muestren la relación que se guarda entre las construcciones teóricas y los hechos experimentales. Es así como la historia se introduce con fines pedagógicos en los que los aportes de la historia y la epistemología de las ciencias permiten esclarecer las características fundamentales de la ciencia y el trabajo científico.

Por otro lado, en los cursos de electromagnetismo dictados a nivel general, no es posible abordar algunos temas debido a que su explicación se sale de los límites del curso, como en el caso del fenómeno del ferromagnetismo. Puesto que, los conceptos de la mecánica cuántica que se requieren para explicar este fenómeno, no son adecuados en el desarrollo de estos cursos. Esto genera, que se tengan ideas erróneas acerca del comportamiento de los materiales ferromagnéticos, al igual del desconocimiento de la gran importancia de la teoría cuántica en la explicación del ferromagnetismo. Así, se hace necesario en el departamento de física, un estudio histórico que permita contextualizar dicha importancia. Ya que, como lo afirma Erwin Schrödinger, la historia es la más fundamental de todas las ciencias, porque no hay conocimiento humano que no pierda su carácter científico cuando los hombres olvidan las condiciones en que fue originado, las preguntas a las que respondió y las funciones para las cuales fue creado (Schrödinger, 1956).

Así, se ve la importancia de la historia de la física en la enseñanza de la misma, gracias a que de esta forma se permite la contextualización de los problemas que se tenían en torno a un fenómeno, las barreras que tuvieron que ser superadas y aquellas ideas que generaron progreso, y las repercusiones tecnológicas que alcanzaron su desarrollo. Otra razón para utilizar la historia y la epistemología de la Física en la enseñanza, es su contribución a un posible cambio de actitud más favorable de los estudiantes hacia el

proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física, siendo un punto notable en este propósito el no centrarse solamente en el contenido de la Física sino también abordar la Física como una actividad humana (garzón, 2012). Entonces, se hace evidente que la historia de las ciencias no solo tiene un gran valor en el proceso de enseñanza de la misma, sino que también adquiere un papel importante en el proceso de aprendizaje de las ciencias por parte de los estudiantes.

Teniendo en cuenta lo dicho se plantean las siguientes preguntas:

¿Cuáles fueron las dificultades que se tenían en torno al planteamiento del ferromagnetismo desde la física clásica, y cómo se dio solución a dichas dificultades a través de la mecánica cuántica?

¿Cómo el conocimiento de estos antecedentes contribuye a la comprensión de los fenómenos ferromagnéticos y de paso a la enseñanza de la física?

Sobre los objetivos de la investigación

Objetivo general

Realizar un análisis histórico de los modelos físico-matemáticos planteados en torno al fenómeno del ferromagnetismo, y su evolución durante el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, destacando cual fue su planteamiento desde la física clásica, hasta su planteamiento a partir de la mecánica cuántica y como este análisis histórico facilita la enseñanza-aprendizaje de dicho fenómeno.

Objetivos específicos

- Realizar una descripción que permita comprender cómo se presenta el ferromagnetismo a nivel atómico.
- Hacer una reconstrucción histórica, que permita la contextualización de las condiciones en que fueron desarrolladas las diferentes teorías del ferromagnetismo.
- Diferenciar cualidades del ferromagnetismo de otras propiedades magnéticas de la materia, tales como el diamagnetismo y el paramagnetismo.
- Destacar los aportes del análisis de textos originales en la comprensión del fenómeno del ferromagnetismo y en la enseñanza de la física.

Antecedentes

A continuación se describirán algunos trabajos encontrados en la Universidad Pedagógica Nacional y en la Universidad Nacional de Colombia, los cuales serán de utilidad para el desarrollo de este trabajo.

En el tema del ferromagnetismo, se encontró un trabajo en el cual se hace el desarrollo cuántico del ferromagnetismo dándole validez al principio de exclusión de Pauli. En este trabajo, también se describe algunos conceptos clásicos desarrollados para este fenómeno, tales como la magnetización. Este trabajo lleva por título *validez del principio de exclusión de Pauli en la interpretación y explicación cuántica del ferromagnetismo realizado por Miller Giovanni Peña Marín*. Donde dicha explicación, se desarrolla de una forma matemática, lo cual será de mucha utilidad para el desarrollo del presente trabajo.

Otro trabajo encontrado, presenta las propiedades magnéticas de la materia mostrando su utilidad en la vida cotidiana y en la tecnología moderna, sin olvidar los intereses que se tuvieron para llegar al planteamiento de los conceptos relacionados a las propiedades magnéticas que tiene la materia. También, se desarrollan unas experiencias relacionadas con el tema, que serán de gran utilidad cuando se realice la explicación y la diferenciación del ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo. El título del trabajo tiene por nombre *aproximación al aprendizaje de las propiedades magnéticas de la materia en alumnos de nivel medio realizado por Ana Eugenia Rodríguez y Diana Patricia Pinto*.

En un tercer trabajo, se realiza una descripción de la importancia de la experimentación en la enseñanza de la física, mostrando la relación que guarda la experimentación con los conceptos teóricos. También, se describe de forma cualitativa, el efecto de Histéresis en los materiales ferromagnéticos, lo cual, será de gran utilidad cuando se realice la descripción de dicho efecto. El trabajo tiene por nombre *el estudio de las propiedades magnéticas de la materiales desde un enfoque experimental como contribución a la alfabetización científica realizado por Yecit Jamir Torres y Luis Eduardo Cuellar (2012)*.

En un trabajo de maestría, se da la explicación de los dominios magnéticos, de las paredes de Bloch y de la ley de Curie-Weiss de los materiales ferromagnéticos. De igual forma, este trabajo será de gran utilidad para el desarrollo matemático del presente trabajo. Este trabajo tiene por título *Estudio de la respuesta ferróica en compósitos $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3/\text{BaTiO}_3$ realizado por Myriam Cristina Reyes Ortiz (2010)*.

En el desarrollo del presente trabajo, los trabajos que serán de mayor relevancia son los textos originales encontrados relacionados con el ferromagnetismo. Esto debido a que a partir del análisis de ellos se dará cuenta del desarrollo de la explicación de dicho fenómeno. Los textos analizados son 5 en total, con los cuales se pretende interpretar los diferentes factores involucrados en el ferromagnetismo. Estos textos fueron publicados dentro del periodo de tiempo de interés lo que será de gran utilidad para concentrar la construcción histórica en dicho periodo.

Sobre la metodología de la investigación

El presente trabajo, se realizo haciendo uso de la metodología descriptiva: *los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis (Dankhe, 1986)*. Como se realizo un análisis histórico, se fue describiendo, los autores involucrados y sus aportes a la teoría, de igual manera las condiciones en que fue creada la teoría y las preguntas que respondió. En relación con el enfoque histórico, se utilizaron algunos textos originales desarrollados en torno al fenómeno del ferromagnetismo. Con ellos se logró enriquecer el análisis histórico pretendido en el presente trabajo. De igual forma, dichos textos son

de gran importancia para hacer la comparación entre los diferentes autores involucrados, lo que permite dar cuenta del cambio en la explicación tanto teórica como experimental que surgieron alrededor del fenómeno. Con todo ello, se pudo finalmente realizar las conclusiones relacionadas tanto con la historia del fenómeno mismo como de algunas consideraciones pedagógicas en relación del uso del análisis histórico de los textos originales en la enseñanza de la ciencia y en particular de la física.

Fases del Proyecto

El trabajo se dividió en cuatro momentos de investigación que permitieron el desarrollo completo del trabajo:

Primer momento recopilación de información. En este momento de la investigación, se buscó todas las referencias bibliográficas necesarias para el desarrollo del trabajo. De igual manera, todos los antecedentes relacionados con el tema, que permitieron una complementación importante para la investigación.

Segundo momento interpretación y construcción histórica. En este momento de la investigación, se interpretó y analizó la información encontrada, con el fin de realizar la reconstrucción y descripción histórica del fenómeno, en los siglos XIX y XX, teniendo en cuenta los autores involucrados y las preguntas que se tenían respecto al ferromagnetismo.

Tercer momento explicación matemática del ferromagnetismo. En este momento de la investigación, se mostraron algunos de los conceptos matemáticos involucrados en el fenómeno del ferromagnetismo, desde los desarrollados bajo la física clásica hasta los de origen cuántico.

Cuarto momento explicación de diferencias del ferromagnetismo del diamagnetismo y paramagnetismo. En este momento de la investigación, se evidenció de una forma muy breve en que consiste el diamagnetismo y paramagnetismo, y cuáles son las diferencias que tienen estos fenómenos, respecto al fenómeno del ferromagnetismo.

Capítulo 1

Conceptos teóricos del Ferromagnetismo.

1.1. Modelo clásico

1.1.1. Clasificación de los materiales magnéticos.

En este capítulo se mostrarán los contenidos matemáticos y físicos de algunos conceptos desarrollados por los autores involucrados en el ferromagnetismo. El experimento con el electroimán llevado a cabo por Faraday que permitió la clasificación magnética de la materia, la descripción de las corrientes amperianas para la magnetización de los materiales ferromagnéticos realizado por Ampère, los conceptos de dominios magnéticos y campo molecular de Weiss, la ley de Curie para el paramagnetismo y el concepto de interacción de canje son algunos de los conceptos que se describirán en este capítulo. Todo esto con el fin de que cuando se describa históricamente el surgimiento y utilidad de estos conceptos, se entienda en qué consisten y como se expresan matemáticamente. Muchos de estos conceptos fueron sacados de libros de textos relacionados con magnetismo en la materia con el fin de que así se muestre más detallado la utilidad en la explicación del fenómeno. Con todo esto, cuando en la descripción histórica se hable de todos estos conceptos se entienda de que se está hablando.

Diamagnetismo.

Supongamos que tenemos un electroimán que produce un campo magnético muy intenso, y que dicho electroimán tiene una de sus partes en punta y la otra parte tiene forma plana como se ve en la *figura 1-1*. Donde el campo magnético es más intenso en la pieza en forma de punta que la pieza en forma plana.

En medio del electroimán colocamos un trozo de material atado a un hilo largo, cuando encendamos el electroimán habrá una fuerza sobre este pequeño trozo de material. Podemos ver esta pequeña fuerza debido al ligero desplazamiento del material suspendido en el hilo. Ahora si colocamos un pequeño cilindro de bismuto en el medio del electroimán, lo que notamos es que el pequeño cilindro es repelido (levemente) alejándose del polo en forma de punta, donde el campo magnético es más intenso, como se ve en la *figura 1-2*.

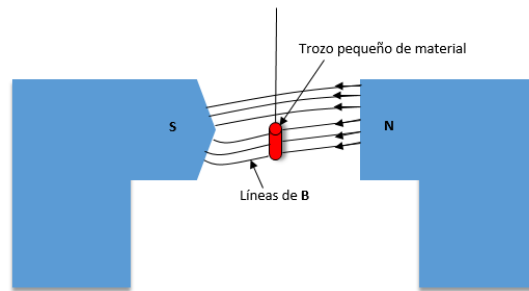


Figura 1-1. un electroimán que tiene una parte en punta y la otra parte es plana. el campo magnético es mas intenso en la parte en punta.

Los materiales que son repelidos por un campo magnético son conocidos como diamagnéticos. A pesar de que el bismuto es uno de los materiales diamagnéticos más intensos, los efectos de repulsión son muy pequeños. El diamagnetismo siempre es muy débil.

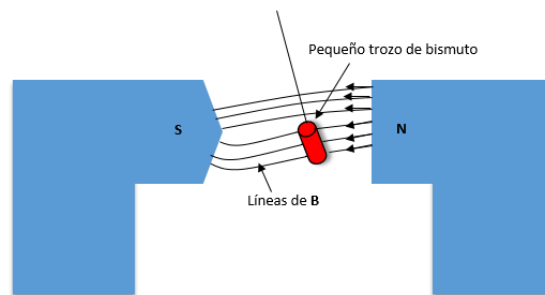


Figura 1-2. el polo en punta repele débilmente el pequeño cilindro de bismuto

Ahora de acuerdo a los conceptos de la susceptibilidad y permeabilidad¹, haremos una explicación cuantitativa de los materiales diamagnéticos. Para estos materiales, tanto la susceptibilidad como la permeabilidad son menores que uno, es decir ≤ 1 . En la mayoría de los materiales diamagnéticos (como el bismuto, plomo, cobre, silicio y diamante, por ejemplificar algunos) la susceptibilidad magnética es del orden de -10^{-5} . A temperaturas bajas cerca del cero absoluto, ocurre lo que se conoce como el diamagnetismo perfecto donde $\chi_m = -1$.

Del anterior análisis, surge la pregunta ¿por qué los materiales magnéticos son repelidos por los campos externos? Para dar una respuesta a la anterior pregunta, es necesario ver como es el comportamiento de estos materiales a nivel atómico. En muchas sustancias los átomos no tienen momentos magnéticos permanentes, es decir, que todos los imanes que los átomos tienen en su interior se compensan exactamente de tal forma que el momento magnético de cada átomo es igual a cero. Así cuando se aplica un campo magnético se generan pequeñas corrientes adicionales por inducción dentro del átomo, estas corrientes son conocidas como corrientes amperianas. Donde según la ley de Lenz el sentido de estas corrientes inducidas es tal que se oponen al aumento del campo. Como consecuencia, los momentos magnéticos inducidos de los átomos se oponen al campo magnético. Este es el comportamiento a nivel atómico de los materiales diamagnéticos.

¹Estos conceptos se pueden ver en el apéndice A

Paramagnetismo.

Si ahora suspendemos un pequeño cilindro de aluminio en medio de los dos polos, igual al caso anterior, también habrá una fuerza débil, pero a diferencia del caso anterior, el desplazamiento (leve) del pequeño cilindro de aluminio será hacia el polo en punta tal como lo indica la *figura 1-3*. Los materiales que son atraídos levemente por un campo magnético, son conocidos como paramagnéticos.

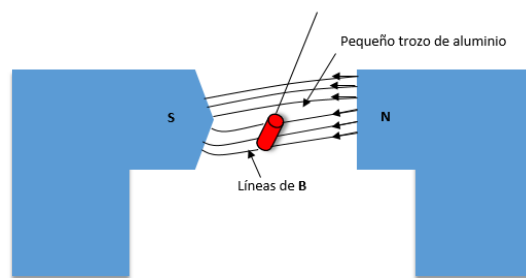


Figura 1-3. el polo en punta atrae débilmente el pequeño cilindro de aluminio

Para los materiales paramagnéticos, la permeabilidad relativa $\mu_r \geq 1$. En la mayoría de los materiales paramagnéticos (como el aire, aluminio, platino y el potasio, por ejemplificar algunos) la susceptibilidad magnética χ_m está en el orden de $+10^{-5}$ a $+10^{-3}$, y dependen de la temperatura. En los materiales paramagnéticos a diferencia de los materiales diamagnéticos, los átomos tienen momentos magnéticos no nulos. Cuando hay un campo magnético, los momentos magnéticos de los átomos tienden a alinearse con dicho campo magnético, y el magnetismo inducido tiende a aumentar el campo magnético.

Ahora si en los materiales paramagnéticos hay ordenamiento de momentos magnéticos ¿por qué el efecto de atracción es tan pequeño como se muestra en la figura 1-3? Esto se debe a que las fuerzas de alineamiento son muy débiles en comparación con las fuerzas provenientes de los movimientos térmicos que tienden a destruir el orden. Por esta razón el paramagnetismo es dependiente de la temperatura. En el paramagnetismo entre menor es la temperatura mayor es el alineamiento de momentos magnéticos, ya que, a temperaturas bajas los efectos de desorden debido a las colisiones son menores.

Ferromagnetismo.

Si suspendemos un pequeño cilindro de hierro en medio del electroimán, observamos que a diferencia de los dos casos anteriores, el pequeño cilindro de hierro es atraído con una gran fuerza al polo que tiene forma de punta como lo muestra la *figura 1-4*. Los materiales que son atraídos fuertemente por un campo magnético son conocidos como ferromagnéticos.

Para los materiales ferromagnéticos, la permeabilidad relativa es $\mu_r \gg 1$, de modo que su susceptibilidad también es bastante elevada. Los materiales ferromagnéticos más intensos son el hierro, níquel y el cobalto. A continuación se muestra algunas propiedades que tienen dichos materiales ferromagnéticos:

- Pueden ser magnetizados en un muy alto grado por un campo magnético.

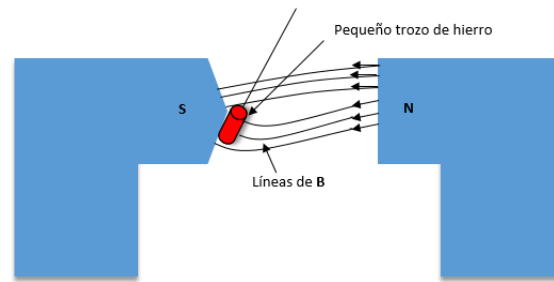


Figura 1-4. el polo en punta atrae fuertemente el pequeño cilindro de hierro

- Preservan un alto nivel de magnetización cuando se les aparta de un campo magnético externo.
- Pierden su magnetización cuando su temperatura excede el punto de Curie, y se comportan como materiales paramagnéticos lineales. Así para el hierro el punto de Curie es de 770°C .
- Son no lineales; porque en su caso μ_r depende de $\mathbf{B}$ y no puede representarse con un solo valor.

Así para el níquel, por ejemplo, μ_r varía de 50 a 600 en algunas condiciones. Los materiales ferromagnéticos tienen momentos magnéticos no nulos, donde en condiciones normales, es decir, a temperatura ambiente, estos materiales reaccionan fuertemente bajo la acción de un campo magnético externo.

1.1.2. Corrientes de magnetización.

Al estudiar los fenómenos magnéticos, es necesario describir una de las características más importantes que presentan los materiales magnéticos, la magnetización.²De acuerdo a ello, surge la pregunta ¿que produce dicha magnetización? aunque la magnetización esta relacionada con los momentos magnéticos que hay dentro del material, aun se queda con la pregunta de como se generan estos momentos magnéticos. Mucho antes de que se conociera la estructura interna del átomo, André-Marie Ampère propuso un modelo que explicaba la magnetización de materiales. El modelo de Ampère establecía que se debía a pequeñas corrientes microscópicas dentro del material magnético . Si tratamos de imaginar como serian estas corrientes magnéticas, serían como lo muestra la *figura 1-5*.



Figura 1-5. modelo de corrientes de ampere, donde hay una magnetización neta a lo largo del eje del cilindro.

²Para ver la descripción de la magnetización véase el apéndice B.

Ahora surge la siguiente pregunta ¿cual sería la corriente efectiva? si el material es homogéneo, la corriente neta en cualquier punto dentro del material será cero debido a que a cada corriente corresponde otra que va en sentido opuesto. Sin embargo, como en la superficie del material no existe cancelación, el resultado de estas corrientes microscópicas es una corriente sobre la superficie del material. Donde esta corriente amperiana es análoga a la corriente en los arrollamientos de un solenoide, tal como lo muestra la *figura 1-6*.

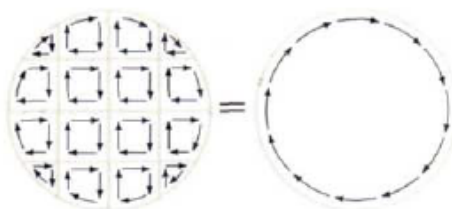


Figura 1-6. las corrientes dentro de un material uniformemente magnetizado se cancelan permaneciendo solo una corriente superficial. Independiente de la forma que tenga las espiras.

En la figura se muestra una pequeña sección del cilindro que tiene una área A y volumen $dv = Adl$. Sea di la magnitud de la corriente en la superficie del disco, el momento dipolar magnético estará dado por:

$$d\mu = Adi$$

recordando que la magnetización es el momento magnético por unidad de volumen:

$$M = \frac{d\mu}{dv} = \frac{Adi}{Adl} = \frac{di}{dl} \quad (1-1)$$

Así, la magnitud del vector magnetización esta dado por la corriente amperiana por unidad de longitud. Del anterior análisis, se deduce que la unidades del vector magnetización es amperios por metro. Ampère propuso que en los átomos que componían los materiales magnéticos, era donde se producían las corrientes, a pesar de ello, no logró explicar la razón por la cual se generaban estas corrientes. De igual forma, quedaba abierta la pregunta de por qué en estado natural los materiales no mostraban una magnetización neta solo hasta que dicho material fuera sometido a la acción de un campo magnético externo.

1.1.3. Dominios magnéticos.

En los materiales ferromagnéticos los momentos magnéticos son muy intensos, como ya se dijo antes, ahora imaginemos que en una región de hierro lo suficientemente grande para contener millones de átomos, los momentos magnéticos de dichos átomos están orientados en la misma dirección, a temperaturas ambiente la orientación de dichos momentos magnéticos es casi perfecta, tal y como lo muestra la *figura 1-7*.

De lo anterior nos surge la siguiente pregunta ¿Si todos los momentos magnéticos están alineados, porque un pedazo de hierro cualquiera no es un imán a temperatura ambiente?

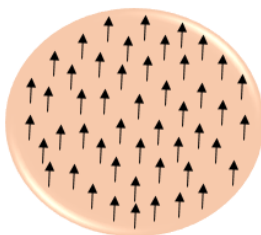


Figura 1-7. orientación ordenada de los momentos magnéticos atómicos, cada flecha representa la orientación de cada momento magnético.

(Berkeley, 1988, pag.431). Bueno la respuesta a esta pregunta es que en un pedazo de hierro, no imantado, hay muchos dominios, en cada uno de los cuales los momentos magnéticos de los átomos están orientados en una dirección dada, que es diferente a la dirección de los dominios vecinos, tal como se muestra en la *figura 1-8*.

En general, en toda la pieza de hierro la dirección de todos estos dominios que se observan en la figura 1-8, están igualmente representadas todas las direcciones (Berkeley, 1988). Es decir, que como la orientación de los momentos magnéticos en cada uno de los dominios es espontánea, los momentos magnéticos de los dominios, se anulan unos con otros y en general no habrá un campo magnético medible.

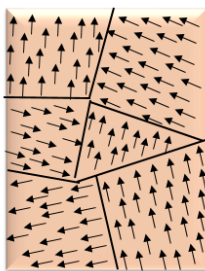


Figura 1-8. distribución de dominios magnéticos en una muestra de hierro.

Los dominios magnéticos son microscópicos en el sentido corriente de la palabra, esto a escala atómica es muy grande, es decir, que un domino magnético puede tener miles de millones de momentos magnéticos, pero a escala macroscópica estos dominios son muy pequeños siendo insignificantes.

1.1.4. Punto y ley de Curie.

Hemos dicho que los materiales ferromagnéticos a temperaturas ambientes, reaccionan fuertemente a la acción de un campo magnético externo. Ahora algo muy interesante del ferromagnetismo es lo siguiente: un material ferromagnético, por ejemplo, el hierro puro, pierde sus propiedades ferromagnéticas, de manera bastante brusca, cuando se calienta a una temperatura determinada (Berkeley, 1988 p. 430). Cuando el material ferromagnético se enfría de nuevo por debajo de esta temperatura, recobra sus propiedades ferromagnéticas. Esta temperatura de transición, es conocida como punto de Curie, ya que, fue Pierre Curie quien trabajo sobre los efectos de la temperatura en el magnetismo

que tiene la materia. Para el hierro puro, el punto de Curie es de 770°C , es decir, que a temperaturas mayores el hierro pierde sus propiedades ferromagnéticas, en el *cuadro 1-1* se muestran los puntos de Curie de los materiales ferromagnéticos más intensos.

Material	$T_c K$
Fe	1043
Co	1394
Ni	631

Tabla 1-1. Materiales ferromagnéticos mas intensos

Cuando un material ferromagnético sobrepasa la temperatura de Curie, la situación que se observa en la *figura 1-8* es muy diferente. Ya que los momentos magnéticos de los átomos son orientados al azar, es decir, los dominios magnéticos desaparecen debido a la excitación que los efectos térmicos ejercen sobre los átomos. Aquí se genera una transición de fase, gracias a que por encima del punto de Curie los materiales ferromagnéticos, pasan a comportarse como materiales paramagnéticos. En la *figura 1-9*, se observa el comportamiento de variación, para el hierro, de la magnetización M cuando la temperatura se incrementa.

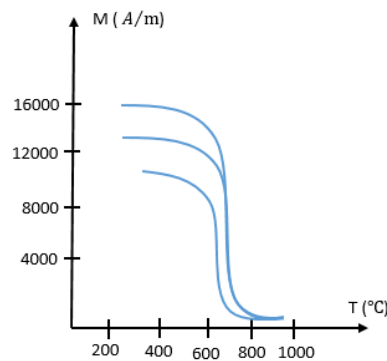


Figura 1-9. magnetización del hierro en función de la temperatura.

La magnetización es proporcional al campo magnético aplicado, pero inversamente proporcional a la temperatura como lo muestra la figura 1-9. Esta relación se muestra en la siguiente ecuación.

$$\vec{M} = \frac{C}{T} \vec{H} \quad (1-2)$$

La anterior ecuación, es conocida como la ley de Curie, ya que, fue Pierre Curie el primero en mostrar esta relación experimentalmente. La constante C que aparece en la ecuación 1-2, es llamada constante de Curie. Dicha ecuación muestra que la magnetización y el campo magnético son proporcionales, por decirlo de otra forma, la ecuación 1-2 solo es aplicable a materiales que sean lineales, es decir, materiales paramagnéticos.

Esta ecuación solo es válida para temperaturas elevadas o para campos magnéticos débiles, puesto que, falla cuando los momentos magnéticos se encuentran alineados; es decir, cuando se está alcanzando la saturación magnética (magnetización espontánea).

Así en este punto, la magnetización y el campo magnético dejan de tener una relación lineal. En conclusión, la ley de Curie no es aplicable para los materiales ferromagnéticos. Entonces surge la pregunta ¿hay una forma de mostrar el comportamiento de los materiales ferromagnéticos por encima y por debajo del punto de Curie? La respuesta es sí, dicha explicación la proporciona los estudios realizados por Pierre Weiss en el año de 1907.

1.1.5. Ley de Curie-Weiss y campo medio.

En el año de 1907, Pierre Weiss realizó una teoría para explicar el fenómeno del ferromagnetismo. Esta fue una de las primeras teorías que explicaban dicho fenómeno. Weiss planteaba que para que haya orden magnético debería existir alguna interacción que lo justificara, así, Weiss sugirió la existencia de un campo molecular que fuera el responsable de dicho orden magnético (todo esto lo planteó antes del surgimiento de la mecánica cuántica). Así, se puede escribir una relación entre la magnetización y el campo de la siguiente forma:

$$\vec{H}_m = \gamma \vec{M} \quad (1-3)$$

Donde γ es la constante de Weiss independiente de la temperatura. El campo medio de Weiss, tiende a alinear los momentos magnéticos vecinos y es lo suficientemente intenso para mantener alineados los momentos magnéticos en la misma dirección en un dominio magnético. Así, el campo magnético efectivo que experimenta un momento magnético de un átomo es la suma del campo magnético aplicado y el campo medio:

$$\vec{H}_e = \vec{H} + \vec{H}_m = \vec{H} + \gamma \vec{M} \quad (1-4)$$

Sabemos que la temperatura de Curie, es la temperatura a la cual los materiales magnéticos pierden su magnetización espontánea, entonces cuando $T < T_c$ hay orden magnético y cuando $T > T_c$ los efectos de desorden hacen que los materiales pierdan su magnetización espontánea (fase paramagnética) entonces si remplazamos la ecuación 1-4 en la ecuación 1-2 obtenemos:

$$\vec{M} = \frac{C}{T} (\vec{H} + \gamma \vec{M}) \quad (1-5)$$

Reorganizando la ecuación 1-5 obtenemos:

$$\vec{M} (1 - \frac{C}{T} \gamma) = \frac{C}{T} \vec{H} \quad (1-6)$$

Recordando que $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ tenemos que³:

$$\chi_m \vec{H} (1 - \frac{C}{T} \gamma) = \frac{C}{T} \vec{H} \quad (1-7)$$

³Mirar el apéndice A para ver de donde sale esta expresión.

Despejando χ_m tenemos:

$$\chi_m = \frac{C}{T - C\gamma} = \frac{C}{T - T_c} \quad (1-8)$$

Donde $T_c = C\gamma$ la ecuación 1-8 se conoce como la ley de Curie-Weiss, donde dicha ecuación describe el comportamiento de los materiales ferromagnéticos por encima del punto de Curie y muestra la transición de dichos materiales a una fase paramagnética.

1.2. Modelo cuántico

1.2.1. Interacción de canje.

El origen del campo medio de Weiss permaneció en la oscuridad hasta el surgimiento de la mecánica cuántica. En 1928, Heisenberg demostró que este campo es el resultado de la interacción cuántica de intercambio, que no tiene analogía en la mecánica clásica. Dicha interacción esta directamente relacionada con los momentos magnéticos de los átomos individuales, los cuales, son responsables de las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos. Heisenberg señaló que es el momento de spin el que juega el papel dominante en el ferromagnetismo. Así las fuerzas de intercambio son el resultado de la interacción de los momentos angulares de spin de dos átomos vecinos. Heisenberg sugirió que entre átomos de spin S_i y S_j hay una interacción con energía:

$$W_{ij} = -2JS_iS_j \quad (1-9)$$

Donde J es la integral de canje, la cual, es calculada a partir de las funciones de ondas electrónicas de dos átomos próximos. Cabe aclarar que esto es aplicable para electrones desapareados.⁴ Una característica importante de destacar de la energía de canje, es su rápida atenuación cuando aumenta la separación entre los átomos i y j. Así en muchas ocasiones es acertado suponer que se anula excepto para los átomos adyacentes mas próximos en una muestra de material.

La energía de canje ecuación 1-9, depende también de la forma como se encuentren alineados los vectores de spin. Así cuando dichos vectores de spin son paralelos, la energía de canje alcanza un valor mínimo y J toma valores positivos. De este modo, la interacción de canje tenderá a alinear los momentos magnéticos de los átomos próximos (Hlawiczka, 1977), esta es la propiedad característica de los materiales ferromagnéticos. Para la mayor parte de materiales, la integral de intercambio J es negativa, es decir, que el alineamiento entre átomos es antiparalelo. Justamente, el hecho de que en los materiales ferromagnéticos el alineamiento de los spines sea paralelo, es lo que hace que su permeabilidad sea tan alta.

La tendencia que tienen los spines de alinearse entre si, se traduce como una magnetización local espontánea del material. Entonces si tuviéramos una muestra macroscópica, deberíamos pensar que toda ella quedaría uniformemente magnetizada como lo indica

⁴Un electrón desapareado son aquellos que no tienen su spin compensado por otro electrón de spin opuesto en el mismo átomo.

la figura 1-10(a). De esta forma, el efecto resultante que esperaríamos sería el aumento sustancial de la energía del sistema por la cantidad almacenada en el campo magnético externo que produciría el material. Pero lo que se observa es que un material ferromagnético que no es sometido a un campo magnético externo, no tiene una magnetización neta. Así para que el sistema quede en un estado de energía mínima, se contrarresta los efectos del campo magnético externo disgregando la magnetización en dominios. La figura 1-10(b) muestra dos dominios magnéticos, en dicha disposición, la energía magnetostática sería inferior a la mitad de la figura 1-10(a). En la figura 1-10(c) los dominios se ordenan de tal forma que el flujo asociado se cierra sobre si mismo.⁵

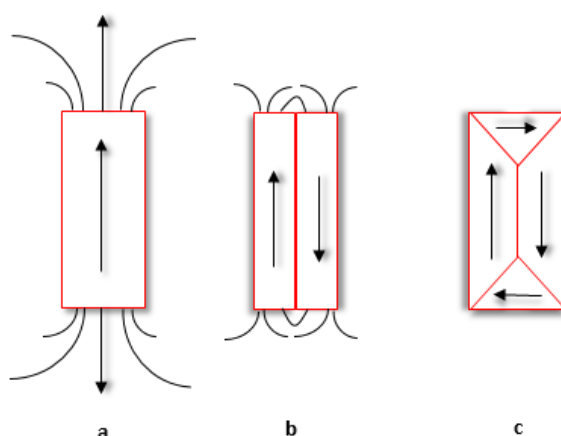


Figura 1-10. dominios magnéticos.

La disgregación de la magnetización de una muestra macroscópica en dominios, elimina la energía magnetostática de campo magnético externo. Sin embargo, aparece una energía adicional debido a la formación de paredes de los dominios, los cuales constituyen la transición entre grupos de spins de diferente orientación (Hlawiczka, 1977, p.361).

1.2.2. Energía de anisotropía.

En la sección anterior, se dio por hecho que la formación de dominios magnéticos se da con la misma facilidad en cualquier dirección. Pero en realidad no es así, ya que, las fuerza en la red cristalina del material ferromagnético no son uniformes en todas las direcciones⁶, sino que dependen de la geometría que tenga la red cristalina del material⁷. las fuerzas que se presentan en una red son de naturaleza electrostática; no pueden afectar directamente a los spins. Sin embargo, pueden afectar al movimiento orbital de los electrones haciendo que la posición de estas órbitas coincidan con una configuración en donde la energía sea mínima en relación a la red. De esta manera, este efecto se transmite a los spins por medio del acoplamiento spin-orbita.

Una consecuencia del interacción anterior, es que los spin se alinean con mayor facilidad

⁵Este caso particular representa una situación idealizada, aplicable en dos dimensiones solamente, pero ilustra el principio general.

⁶Isotropía

⁷Anisotropía

en ciertas direcciones de la red que en otras. Lo cual, es denominado anisotropía⁸. Las fuerzas suplementarias requeridas para orientar un grupo de spins según una dirección dura, implica que una disposición tal supone una cantidad adicional de energía. Esta recibe el nombre de *energía de anisotropía* (Chikazumi, 1997). Así, los spins tienden a orientarse en direcciones favorables; donde la energía de anisotropía sea menor. Por otro lado, dentro de las paredes que separan los dominios, habrá spins que tienen que tomar direcciones en las cuales la energía de anisotropía sea alta. Con esto, se espera que el anterior hecho sea uno de los factores que determine el espesor y el tamaño de las paredes de dominios.

1.2.3. Paredes de Bloch.

Si a nivel microscópico en una muestra de hierro tenemos varios dominios magnéticos, entonces debe haber regiones en donde los momentos magnéticos cambien de dirección. Estas regiones, son conocidas como paredes de Bloch y son las fronteras entre los dominios, es decir, que en estas fronteras es donde se dan las transiciones de dirección de los momentos magnéticos que contiene los dominios magnéticos, tal como se puede ver en la *figura 1-11*.

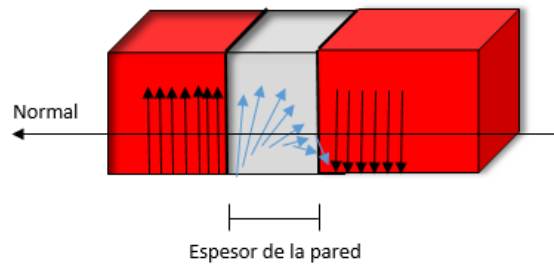


Figura 1-11. el espacio en donde ocurre la transición de un dominio a otro se conoce como pared de Bloch.

La dirección de la magnetización gira gradualmente alrededor de una normal al plano de la pared tal como se ve en la figura 1-11. La energía de canje necesaria para la formación de una pared de Bloch se calcula como sigue: se supone que todos los átomos que componen un material ferromagnético, tiene el mismo momento angular de spin S , la energía de canje entre dos átomos adyacentes toma la forma:

$$W = -2JS^2 \cos \psi \quad (1-10)$$

Donde ψ es el ángulo entre spins. Así la energía de canje total de un conjunto de spins que forman una pared de Bloch es:

$$W = - \sum_{i,j} 2JS^2 \cos \psi_{ij} \quad (1-11)$$

⁸O mas precisamente anisotropía cristalina para distinguirlo de otros efectos direccionales que están relacionados con la geometría de la muestra.

Si la pared contiene una cantidad grande de átomos, el ángulo ψ_{ij} es pequeño y de esta forma se puede utilizar la aproximación de segundo orden $1 - \frac{1}{2}\psi_{ij}^2$ de esta forma la ecuación 1-11 toma la forma:

$$W = - \sum_{i,j} 2JS^2 \left(1 - \frac{1}{2}\psi_{ij}^2\right) = - \sum_{i,j} 2JS^2 + \sum_{i,j} JS^2\psi_{ij}^2 \quad (1-12)$$

La primera parte de la ecuación 1-12, representa la energía de canje para una fila de spins paralelos y la segunda parte representa la energía suplementaria de canje para spins no paralelos. Para una pared que separe dos dominios antiparalelos, tenemos que $\psi_{ij} = \pi$. Si ψ_{ij} es el mismo para cada par adyacente y si hay N spin en la pared se puede $\psi_{ij} = \pi/N$ de esta forma:

$$\sum_{i,j} \psi_{ij}^2 = N \left(\frac{\pi}{N}\right)^2 \quad (1-13)$$

Como J y S^2 son constantes para un material, la energía suplementaria para una fila de spin que forman una pared de Bloch estará dada por:

$$W = JS^2 \frac{\pi^2}{N} \quad (1-14)$$

Una expresión para la energía por unidad de área, si tenemos que la constante de un material es a, habrá $1/a^2$ filas de spin en una unidad de área de pared así la energía suplementaria estará dada por:

$$W_{ij} = JS^2 \frac{\pi^2}{Na^2} \quad (1-15)$$

La ecuación 1-15, muestra que la energía de canje disminuye cuando el espesor de la pared aumenta. Por lo tanto, muestra que debería haber una tendencia ilimitada de aumentar el espesor de la pared, con el fin de permanecer en un estado de mínima energía. Pero esta acción viene contrarrestada con la energía de anisotropía que como ya se dijo anteriormente; algunos spins de una pared de Bloch, tienden a alinearse en direcciones de magnetización dura, dando lugar así a una energía de anisotropía. Donde dicha energía por unidad de área para una pared de Bloch esta dada por:

$$W_a = KaN \quad (1-16)$$

Donde K es la constante de anisotropía y aN es el volumen de una unidad de área de pared. De aquí se deduce que la energía de anisotropía aumenta con el espesor de la pared, y al hacerlo, se convierte en una influencia para disminuir el espesor de dicha pared. De aquí decimos que la energía por unidad de área de la pared es la suma de las contribuciones de la energía de canje y la energía de anisotropía:

$$W_{ij} + W_a = JS^2 \frac{\pi^2}{Na^2} + KaN \quad (1-17)$$

1.2.4. Histéresis magnética.

La discusión de las secciones anteriores, describían los materiales ferromagnéticos en ausencia de campos magnéticos externos. Mostrándonos que en dichos materiales había momentos magnéticos no nulos los cuales se distribuyen en dominios magnéticos y que el agente que da lugar al alineamiento de los spins vecinos es la interacción de canje. Ahora analizaremos el comportamiento de los materiales ferromagnéticos cuando es aplicado un campo magnético externo.

Para mostrar cómo es el proceso de magnetización de los materiales ferromagnéticos, podemos establecer ciertos estados por los que pasan dichos materiales cuando aplicamos un campo magnético externo. En primera medida, partimos del estado desmagnetizado, en donde el material no se ha expuesto a un campo magnético externo, es decir, se encuentra en su estado natural⁹. La aplicación de un campo magnético H provocará un ligero movimiento de las paredes, de esta forma los dominios que estén alineados en direcciones aproximadamente paralelas al campo magnético ganarán volumen a diferencia de los dominios que este alineados en otras direcciones. Este movimiento de las paredes de dominio corresponde a ajustes de la energía local en respuesta al campo externo aplicado, siguiendo los criterios de minimización energética. Estos movimientos de los dominios cómo de las paredes pertenecen al estado de magnetización reversible: donde la magnetización de cada dominio rota reversiblemente partiendo de las direcciones estables. simultáneamente las paredes rotan reversiblemente desde sus posiciones estables. El proceso se presenta esquemáticamente en la primera parte de la curva de magnetización de la figura 1-12 señalado con OA. Cuando se aumenta el campo aplicado H , la magnetización experimenta cambios drásticos. Las paredes de dominio rotan en direcciones distintas de las de magnetización fácil. Este proceso es irreversible, es decir, que la rotación de las paredes de dominio no puede volver a su estado anterior. El segmento AB de la curva de magnetización en la figura 1-12 representa este proceso irreversible. Si el campo aplicado H sigue aumentado de valor, la curva de magnetización se vuelve menos empinada y los dominios que estaban alineados en direcciones aproximadas al campo rotan a la dirección del campo. Así, la subdivisión en dominios desaparece y la magnetización alcanza el valor de saturación M_s . Sin embargo, esto no quiere decir que en este estado los spins estén rígidamente alineados con el campo magnético aplicado H . A temperaturas por encima del cero absoluto las vibraciones térmicas hacen que los spins de algunos átomos tengan desviaciones aleatorias respecto con la posición de mínima energía que supone el alineamiento con el campo. Lo anterior, trae como consecuencia que la magnetización promedio del material varíe con la temperatura. Este punto sera tratado con mas detalle a continuación.

La curva de magnetización que muestra la figura 1-12, es para un campo magnético aplicado continuamente creciente. Se dijo anteriormente que el movimiento de las paredes de dominio es en gran parte irreversible. Lo anterior quiere decir que cuando el campo magnético aplicado disminuya, la magnetización del material no disminuirá siguiendo la curva indicada en la figura 1-12. De hecho, la magnetización y la inducción magnética en la muestra, serán superiores a la curva inicial. Esta propiedad irreversible de los materiales ferromagnéticos es lo que se conoce como histéresis. Así, la irreversibilidad magnética de los materiales ferromagnéticos queda bien explicado con los ciclos de histéresis, los cuales

⁹En tal estado los dominios presentan una orientación aleatoria y por tanto una magnetización resultante nula.



Figura 1-12. Magnetización de un material ferromagnético.

se pueden obtener si se aplica un campo que varíe desde cero hasta cierto valor máximo H_m , y que luego regrese pasando por cero hasta su correspondiente valor negativo $-H_m$. Un ejemplo es el que se observa en la figura 1-13, la curva de puntos representa la curva de primera magnetización¹⁰, que ya se describió anteriormente. Cuando empezamos a reducir el campo magnético, obtenemos la línea superior que nos lleva al punto B_r . B_r es conocido como el magnetismo remanente¹¹ presente en la muestra cuando el campo magnético aplicado se ha hecho cero. Ahora para eliminar magnetización remanente asociada a este magnetismo, debemos aplicar un campo negativo H_c , es decir, cambiamos la polaridad del campo aplicado. La inducción disminuye siguiendo la curva 2 de la figura 1-13, hasta que $B_r = 0$. Al campo necesario para que la inducción desaparezca se le denomina campo coercitivo. Si continuamos disminuyendo el campo cada vez mas, la inducción pasará a hacer negativa y al igual que pasaba con la curva de primera inducción, llegará un momento en el cual el material llegue a la saturación. Si empezamos a hacer el campo cada vez más negativo, la inducción seguirá la curva 3 de la figura 1-13.

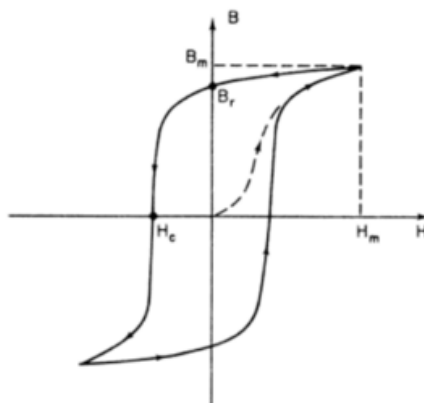


Figura 1-13. Magnetización de un material ferromagnético.

Las causas principales de irreversibilidad en materiales magnéticos son la anisotropía y el anclaje de las paredes de los dominios (Hlawiczka, 1977, p.369). De esta forma, las fuerzas de anisotropía serán las responsables del magnetismo remanente. Cuando el campo aplicado esté en su valor máximo H_m , los dominios estarán alineados en direcciones muy

¹⁰Que se obtiene aplicando un campo a un material que este completamente desmagnetizado.

¹¹Es el nivel de inducción magnética aun existente en una sustancia ferromagnética después de someterla a la acción de un campo magnético.

próximas a la del campo aplicado. Así, cuando dicho campo se haga cero, la magnetización de los dominios se redistribuyen en dirección. Los magnetizados en direcciones fáciles¹² mantendrán sus direcciones paralelas a la del campo, mientras los magnetizados en direcciones difíciles¹³ se relajaran hacia direcciones difíciles. Como consecuencia se tendrá una magnetización remanente y un campo B.

¹²Donde la energía de anisotropía es baja.

¹³Donde la energía de anisotropía es alta.

Capítulo 2

El Ferromagnetismo en el siglo XIX.

2.1. Primeras clasificaciones magnéticas de la materia.

Antes del siglo XVIII, se pensaba que el magnetismo estaba solamente ligado al hierro, debido a que, en este material solo era donde se evidenciaba todos los efectos del magnetismo. Fue en el siglo XVIII, cuando el estudio de los imanes y materiales magnetizados se desarrolla rápidamente. En 1733 y 1755 se observó que el níquel y el cobalto tienen el mismo comportamiento magnético que el hierro, sin embargo, se creía que solo estos tres materiales tenían propiedades magnéticas, ya que, los otros materiales no mostraban ningún comportamiento magnético. No fue hasta el año de 1845, cuando con el uso de los electroimanes, Michael Faraday (1791-1867) descubrió que el magnetismo no solo está relacionado con el hierro.

En septiembre de 1846, Faraday publicó un artículo en la reconocida revista *Philosophical Magazine* en donde sustentaba su idea sobre el magnetismo de la materia. Dicho artículo, se titula *on the magnetic affection of light and on the distinction between the ferromagnetic and diamagnetic conditions of matter*. En el cual, por una parte trata el tema de la interacción entre la luz y el campo magnético, en lo que hoy se conoce como efecto Faraday. Siendo la primera prueba experimental donde se muestra que el magnetismo y la luz están relacionados. Esto sería de gran importancia para que James Clerk Maxwell estableciera su teoría electromagnética 20 años más tarde. Por otro lado, mostraba por medio de un experimento que toda la materia es magnética en cierto sentido. En este artículo, describe cuidadosamente su experimento, mostrando la forma en que construyó la situación que le permitió mostrar el comportamiento de ciertas sustancias cuando se someten a la acción de un campo magnético.

Un año antes, el 30 de agosto de 1845, Faraday tenía una pregunta rondando en su cabeza la cual era, si un campo magnético podría influenciar la luz. Con el propósito de responder dicha pregunta, instaló en su laboratorio un electroimán donde cada una de sus caras¹ las colocó en 5 maneras diferentes, una respecto a la otra, e iluminó una luz polarizada que atravesaba un pequeño cristal² suspendido en un filamento de seda, en medio del campo producido por el electroimán. En las cuatro primeras configuraciones,

¹Una de las caras tenía forma en punta y la otra era plana, esto era con el fin de que en la cara con forma punteada fuera más intenso el campo magnético.

²En dicho tubo de cristal introdujo peróxido de hierro.

no vio cambio alguno en la luz. En la quinta, donde la configuración de las dos caras del electroimán eran paralelas una respecto a la otra, observó un cambio en el estado de polarización de la luz. Aparte de ello, observó que el pequeño cristal, sufría una pequeña atracción hacia la cara que tenía forma punteada. Demostró que el cristal no tenía un magnetismo intrínseco, así dicho efecto debía ser producido por la aplicación de un campo magnético externo. Faraday de acuerdo a dichos resultados, creía que la fuerza magnética debía estar presente en todas las cosas, es decir, en todas las formas de la materia. Él sabía que algunos materiales, tales como el hierro, podían ser magnetizados e incluso mantenían ese magnetismo; otros parecían ser inmunes a dicha fuerza magnética. Con lo anterior, se preguntó ¿cómo poder relacionar esto con la noción de que la fuerza está presente en toda la materia? Faraday comenzó a clasificar dichos materiales de acuerdo a los comportamientos que estos mostraban. Por un lado, estaban aquellos materiales que eran atraídos levemente por el campo producido por el electroimán; los materiales que mostraban este comportamiento los llamó paramagnéticos³. Los materiales que mostraban una leve repulsión por el campo producido por el electroimán, los llamó diamagnéticos. En aquella época, ya se conocían los materiales que mostraban una gran atracción cuando eran sometidos a campos magnéticos: los materiales ferromagnéticos, que eran básicamente tres el hierro, níquel y el cobalto. Para justificar estos comportamientos que mostraban los materiales de estas nuevas clasificaciones, Faraday basó su explicación en la idea de campos, que en aquel momento estaba siendo explorado para tratar de establecer una teoría que diera cuenta de muchos fenómenos físicos. De esta forma, expuso en su artículo que para los materiales paramagnéticos, las líneas de campo podían penetrarlos fácilmente. Por otro lado, los materiales que se comportaban en sentido opuesto, es decir, los diamagnéticos, el campo magnético no podía penetrar dichas sustancias. Como consecuencia, estos materiales eran repelidos por un campo magnético.

Esta clasificación realizada por Faraday, causó cierta confusión sobre nociones previas acerca de por qué los objetos eran magnéticos. Puesto que, los efectos magnéticos solo le eran atribuidos a los tres materiales ferromagnéticos. Esto se debía al hecho de que solo estos tres materiales muestran un efecto cuando interactúan con un campo magnético. De hecho, en su artículo nombrado anteriormente, describe la discusión que mantuvo con Edmond Becquerel acerca de las condiciones magnéticas de la materia quien no admitía la nueva forma o condición de magnetismo que planteaba Faraday. En ese artículo Faraday escribe lo siguiente:

A.E, Bacquerel, en un comunicado que envió a la academia en junio de 1846, tocó el tema de la acción magnética en todos los cuerpos; y en estas alturas, tenía aún la misma opinión que su padre. Necesito citar en unos breves párrafos aquí el estado de su mente. Después de hablar de los resultados de Coulomb y de su padre en 1827 él dijo "estos experimentos han sido realizados por casi 20 años, y aun así M. Faraday ha anunciado de nuevo el fenómeno de magnetismo en la materia, ha puesto a los cuerpos mismos en una nueva clasificación de sustancias, y los ha nombrado sustancias diamagnéticas" estas palabras, y el tiempo de su publicación (enero de 1845), muestran que E. Becquerel no admite la nueva forma, condición o acción magnética, que había demostrado previamente(Faraday, 1845, p.251).

Lo anterior, muestra las reacciones que generó la nueva clasificación de la materia que postulo Faraday. En este caso, Becquerel no aceptaba esta nueva idea de Faraday, ya que,

³ Más específicamente utilizo materiales como platino y aluminio.

defendía los experimentos y resultados que había obtenido su padre en cuanto a los efectos magnéticos que tenía la materia⁴. Lo importante, fue el hecho de que Faraday rompió con la creencia de que solo unos cuantos materiales eran magnéticos⁵, y clasificó la materia en tres grupos, mostrando que, los materiales no solo son atraídos por un campo magnético sino que algunos de ellos son repelidos. Aunque Faraday no pudo mostrar el origen de este magnetismo que mostraba la materia, abrió el camino para que se realizaran experimentos cada vez mas elaborados que permitieran entender el origen de este magnetismo exhibido por la materia.

2.2. Primera hipótesis sobre el ferromagnetismo.

2.2.1. El descubrimiento de Oersted.

Aunque Faraday fue el primero en clasificar magníficamente la materia, desde antes se tenía la idea de que la electricidad y el magnetismo estaban relacionados de alguna forma. Uno de los personajes que estuvo más interesado en esta cuestión fue el físico y químico danés Hans Christian Oersted (1777-1851). Él estaba buscando una conexión entre la electricidad y el magnetismo, ya que, estaba totalmente convencido que tal conexión debía existir. Así que, comenzó a buscar el *Santo Grial* que para él estaba representado por la conexión de la electricidad con el magnetismo. La idea de Oersted empezó por un extraño suceso que les ocurría a los navegantes cuando estos iban viajando en sus barcos y se encontraban en medio de las tormentas, utilizaban sus brújulas para orientarse, pero en algunas ocasiones cuando algunos rayos caían muy cerca de los barcos, notaban que las agujas imantadas de las brújulas se invertían misteriosamente. Nadie comprendía por qué ocurría tal cosa.

Así en el año de 1820, Oersted dio su famosa clase⁶. Él pensó, en hacer un experimento que involucrara un flujo de electricidad a través de un delgado alambre de platino y observar si afectaba a una brújula que se colocaba cerca del alambre. Era un experimento fácil de desarrollar, pero él no tenía mucho tiempo para intentar hacerlo antes de la clase. Decidió aplazar dicha demostración porque no sabía si el experimento podía fallar y no quería quedar en ridículo con sus alumnos. Durante el desarrollo de la clase, no resistió la tentación de presentarles el experimento a sus estudiantes en ese mismo instante. Cuando encendió la fuente y la corriente empezó su recorrido a lo largo del alambre, la aguja de la brújula se desvió levemente. Pocos de los presentes en ese momento estaban asombrados, tampoco lo estaba Oersted, el efecto era tan débil que ya antes otros investigadores habían tenido las mismas confusiones respecto al mismo fenómeno. Así que, en ese momento él no estaba totalmente convencido de lo que significaba. Volvió a realizar el experimento, pero en esa ocasión utilizó un alambre más grueso y lo que notó fue que el efecto era mucho más fuerte e inconfundible. Desde ese momento, quedó totalmente convencido de que el efecto ocurría cuando circulaba la corriente por el alambre. Así, el 21 de julio de 1821, envió a numerosas revistas científicas un reporte de cuatro hojas donde describía

⁴Defendía que básicamente los materiales que eran magnéticos son tres hierro, cobalto y níquel, y que no habían mas materiales que reaccionaran a efectos de campo magnético.

⁵Es decir, que solo ellos reaccionaban a la acción de un campo magnético.

⁶Un año que él más tarde describiría como el más feliz de su vida científica.

su descubrimiento⁷, en cuestión de semanas la noticia se había extendido a lo largo de Europa (Verschuur, 1993). De esta forma, Oersted probó que una corriente eléctrica podía generar magnetismo. Pero ello fue un descubrimiento accidental, no pudo haber predicho que la aguja respondiera de la forma en que lo hizo. Lo que sí era evidente para él, fue que el efecto magnético de una corriente eléctrica tiene un movimiento circular alrededor de la misma⁸. Eso fue un descubrimiento impresionante; el magnetismo producido por una corriente eléctrica no seguía líneas rectas como todos los involucrados en dicha investigación pensaban. Aunque Oersted no trató de representar el fenómeno en un cuadro matemático, se estableció como un gran paso para el conocimiento de la naturaleza de ambos la electricidad y el magnetismo.



Figura 2-1. Famoso experimento de Oersted representado frente a la audiencia, la cual muestra que una corriente eléctrica puede generar magnetismo.

2.2.2. El nacimiento de la electrodinámica.

Con el descubrimiento de Oersted, se abrió paso al entendimiento de la naturaleza del magnetismo y la electricidad. Un paso realizado por el físico francés André-Marie Ampère (1775-1836). Él creció en la villa de Poleymieux cerca de la ciudad de Lyon. Su padre era juez y comerciante de seda; quien tenía la creencia que una buena educación se lograba llevando al niño a una biblioteca y permitiéndole elegir su propio curso. De esta forma, Ampère se interesó por la ciencia, aprendió latín por su cuenta y leyó a personajes como Euclides, Euler, Bernoulli entre otros. Él tuvo una vida privada bastante difícil, lo que influyó enormemente en sus investigaciones. En el año de 1789, cuando tenía 14 años, comenzó la revolución francesa y su padre fue sentenciado a la guillotina⁹, afectándolo enormemente, ya que, se apartó del contacto social tratando de comprender la muerte sin sentido de su padre. Ampère creció en un ambiente profundamente religioso. Así, durante su juventud siempre buscaba la forma de reconciliar su fuerte fe religiosa con la realidad, es decir, para Ampère era importante aceptar tanto la existencia de Dios como la de una realidad externa. Estos dos factores parecían irreconciliables, puesto que, una estaba

⁷Dicho reporte se titula Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam.

⁸Esto lo dedujo gracias a la forma como se deflectaba la aguja cuando se acercaba al alambre

⁹Cuando los jacobinos tomaron la ciudad de Lyon donde el padre de Ampère era juez.

arraigada a la fe y la otra a los hechos. De esta forma, la salida para el dilema de Ampère estuvo arraigado a los escritos de Kant, los cuales, le permitieron mantener su fe religiosa en el contexto de un universo que parece funcionar racionalmente (Verschuur, 1993). Al poco tiempo, conoció a su primera esposa Julia Carron, quien murió cuatro años más tarde. Se volvió a casar pero su matrimonio no duró mucho y al poco tiempo se divorció.

Su vida profesional fue de igual forma extraña, los primeros 15 años del siglo XIX Ampère los dedicó a las matemáticas; no fue un destacado matemático tan solo competente. Así, en 1815 cambió de profesión convirtiéndose en químico, resultó ser un buen químico, casi descubre el cloro y la ley de Avogadro, de hecho, en Francia se le conoce como la ley de Ampère-Avogadro. El 4 de septiembre de 1820, Ampère estaba en una conferencia en la *académie des sciences* en Francia cuando François Arago (1786-1853) anunció el descubrimiento de Oersted. Esto fue una sorprendente noticia, ya que, la mayoría de los presentes en la conferencia eran conscientes de la afirmación que había hecho Coulomb en 1780, acerca de que la electricidad y el magnetismo no pueden estar relacionados de ninguna manera. Así, después de que Arago terminó su reporte, los presentes en dicha conferencia empezaron a debatir alrededor del descubrimiento de Oersted, Ampère se reservó sus comentarios y de inmediato regresó a su laboratorio para realizar dicho experimento. Replicó el experimento de Oersted, pero para evitar el efecto que tenía el campo magnético de la tierra sobre la brújula, colocó imanes en lugares apropiados, de esta forma, el efecto neto de dichos imanes cancelaba la influencia del campo magnético de la tierra en el lugar donde estaba su aparato. De esa manera, la influencia de la corriente ahora era más fácil de observar. Se dio cuenta que la aguja de la brújula se desviaba hasta formar un ángulo recto respecto al alambre. Esto mostró que el efecto magnético producido, formaba un círculo en el espacio alrededor del alambre tal y como Oersted lo había planteado.

Ampère continuó realizando experimentos, su siguiente experimento consistió en colocar dos alambres paralelos uno respecto al otro, por los cuales circulaba corrientes en el mismo sentido y observar que sucedía. Se dio cuenta que cuando las corrientes iban en el mismo sentido, los alambres se atraían entre ellos y cuando las corrientes iban en sentido opuesto dichos alambres se repelían entre ellos. Estos experimentos, le permitieron formular lo que después sería conocido como la ley de Ampère, la cual, describe la fuerza entre los alambres. Por lo tanto, el legado mas grande de Ampère fue el nacimiento a la noción de que el magnetismo era producido por electricidad en movimiento: lo que actualmente se conoce como electrodinámica.



Figura 2-2. André-Marie Ampère.

2.2.3. Explicación de Ampère del ferromagnetismo.

En relación con el fenómeno del ferromagnetismo, es interesante mostrar cómo las investigaciones realizadas por Ampère tuvieron una gran importancia en brindar una primera hipótesis para entender dicho fenómeno. Para Ampère, la respuesta a la pregunta ¿Qué es el magnetismo? era que, el magnetismo es la fuerza producida por electricidad en movimiento. De esta manera, su gran éxito consistió en reducir el problema del magnetismo al de la electricidad. Esto lo llevó a la conclusión de que el magnetismo mostrado ya sea por un imán, una barra de hierro magnetizado o piedra imán se debía a pequeñas corrientes dentro de cada uno de estos materiales (Verschuur, 1993). Lo que a la vez lo condujo inevitablemente a preguntarse acerca de cuál es el origen de estas corrientes dentro de un imán permanente; interesándose en lo que está a la base de los más profundos niveles de la naturaleza. Consideró que estas corrientes tenían su origen en las moléculas que componían el material, pero de ello surgía una cuestión la cual era ¿Cómo debía ser el contacto entre moléculas para que se evidenciara el magnetismo? para dar respuesta a ello, realizó una ingeniosa analogía, imaginó que el contacto entre moléculas en una barra magnética, era similar a los contactos entre metales en una pila voltaica. Pero Augustin-Jean Fresnel (1788-1827)¹⁰ un amigo de Ampère, le sugirió que dicha idea no podía ser correcta, ya que, corrientes eléctricas fluyendo por conductores (como el hierro) calentaban dicho metal. De forma análoga, si se tenía en cuenta el modelo de la pila voltaica, habría el mismo efecto y por lo tanto el material se calentaría y eso no era lo que se observaba. Así, Fresnel le sugirió en una carta, que como el metal (en este caso hierro) estaba compuesto por moléculas y nada se sabía de ellas¹¹ por qué no imaginar corrientes eléctricas concéntricas fluyendo alrededor de las moléculas mismas. Ampère tomó en cuenta esta sugerencia que le hacía Fresnel y con base en ella desarrolló el modelo de *corrientes Amperianas*, el cual, trataba de explicar la magnetización de los materiales ferromagnéticos.

Ampère era consciente de que en dicha época se creía en la existencia del éter lumínico, el cual, se suponía que era el medio por donde se transportaba la luz a través del espacio. Así que, elaboró una explicación bastante ingeniosa con base al éter lumínico. Comenzó a conjeturar que el éter podía contener una enorme cantidad de fluido eléctrico tanto positivo como negativo, pero en perfecto equilibrio de tal forma que fuera totalmente neutro, excepto quizá en el interior de las moléculas de que se componían los materiales. Su idea consistió en lo siguiente: imaginó que se tenía una molécula o átomo y que se tenía una corriente eléctrica atravesando el éter (fluido positivo junto con fluido negativo), como se muestra en la figura 2-3(a), de tal modo que dichos fluidos están equilibrados. Pero cuando entraban en el interior de la molécula o átomo se podían separar; el fluido positivo tomaría un camino y saldría de nuevo de igual forma que para el fluido negativo, cómo lo muestra la figura 2-3(b). Así, cada uno de dichos fluidos produciría una corriente eléctrica, cómo lo muestra la figura 2-3(c). De este modo, el efecto neto sería un lazo completo de corriente que produciría un campo magnético parecido al producido por una espira de corriente. Aunque Ampère sugirió que dichas corrientes fluían perpendicularmente al eje del imán, no supo explicar el origen de dichas corrientes. Él admitía que el magnetismo y la electricidad estaban conectados en un nivel más allá de la observación directa (Verschuur, 1993).

¹⁰Uno de los personajes mas destacados en el planteamiento ondulatoria de la luz.

¹¹En ese momento.

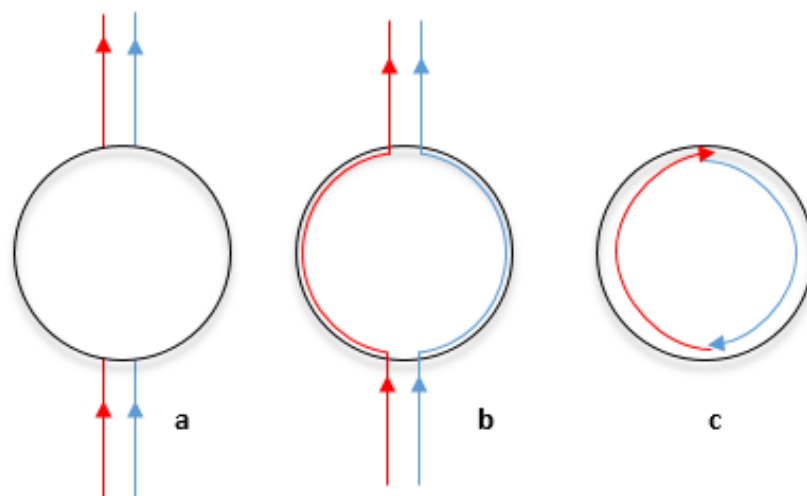


Figura 2-3. fluido electrico atravesando un átomo.

2.3. Concepción del magnetismo en Faraday y Ampère.

Cuando se indaga en la historia de las ciencias, encontramos personajes que realizaron grandes cambios en la forma de entender ciertos fenómenos, gracias a sus ingeniosas ideas. Faraday y Ampère fueron dos de estos grandes personajes y aunque ambos hablan del magnetismo, no tenían la misma visión acerca de este fenómeno. Por esta razón, es adecuado mostrar sus posturas acerca de dicho fenómeno.

Ampère estaba muy influenciado por las concepciones newtonianas, de hecho, en el tiempo de Ampère, muchos de los científicos realizaban explicaciones de fenómenos naturales con base a la teoría newtoniana. El mismo Maxwell, quien admiró toda su vida el magistral trabajo de Ampère, lo llamaría el Newton de la electricidad, debido a que la ley de Ampère de la atracción eléctrica, era similar a la atracción gravitacional de Newton (Verschuur, 1993). Así, en Ampère encontramos la huella newtoniana llevada a la explicación de los fenómenos electrodinámicos. Una prueba de la admiración a la filosofía y método newtoniano, se evidencia en la forma como expresa las reglas para filosofar de Newton:

Primero, observa los hechos, variando en la mayor medida posible sus circunstancias y acompañando estas primeras con medidas precisas de las que puedan deducirse leyes generales fundadas exclusivamente en la experimentación, y de esas leyes deducir -independientemente de toda hipótesis sobre la naturaleza de las fuerzas que producen los fenómenos- el valor matemático de dichas fuerzas, esto es, la formula que las presenta. Ese es el camino seguido por Newton y ha sido generalmente adoptado en Francia por sabios a quienes la física debe los grandes progresos recientes y ha sido así mismo mi guía en todas las investigaciones sobre la electrodinámica¹².

Ampère logra establecer una teoría matemática de la electrodinámica al estilo que lo hizo Newton, es decir, preguntándose no por las causas u origen de las corrientes eléctricas,

¹²Historia general de las ciencias, pag 562. universidad del valle.

sino de la forma en como actúan. Respecto al origen de las corrientes eléctricas, Ampère creía que estas consistían en dos fluidos que circulaban en direcciones contrarias, a lo cual, se le conoce como la teoría de los dos fluidos. Esta teoría, sostenía que la corriente eléctrica estaba compuesta de dos tipos de carga vítreo y resinoso¹³.

A diferencia de Ampère, Faraday estaba en desacuerdo de la noción de fuerzas rectas. Ampère pensaba que la fuerza magnética producida por la corriente tenía dicha naturaleza. Faraday quien era menos arraigado a la tradición, estaba dispuesto a explorar una nueva alternativa: la existencia de fuerzas circulares. Para Faraday, era inconcebible la idea que las fuerzas pasaban de un cuerpo a otro sin pasar a través del espacio que media y que esta acción fuera instantánea; él manifestaba que los cuerpos necesitaban cierto tiempo para responder a la acción de la fuerza. Así, por medio de una serie de experimentos (entre los cuales estaba los que desarrollaron Oersted y Ampère), llegó al planteamiento de la idea de campos. Argumentaba que cuando una corriente fluía a lo largo de un alambre se generaba un campo magnético, así, cuando se tenían dos corrientes paralelas la atracción o repulsión de estos alambres se explicaba como la interacción entre los campos que estas corrientes generaban. Cuando Faraday descubrió la inducción, mostró que era necesario incluir el tiempo en las ecuaciones matemáticas, esto mostraba que las fuerzas no se propagaban instantáneamente sino que lo hacían con cierta velocidad finita, pero esa velocidad era desconocida.

Pero surgía un problema en el planteamiento de Faraday, el cual era ¿de que forma interactuaban dichos campos? para resolver este problema comenzó a realizar ciertos experimentos que le permitieran dar cuenta de la forma como estos campos interactuaban. Colocó dos imanes en una superficie blanca y lisa y comenzó a echar limaduras de hierro alrededor de los imanes. Gracias a lo que observó, llegó a plantear algo que sería muy importante en su teoría de campos, las llamadas líneas de fuerza. Se dio cuenta que los campos de estos dos imanes interactuaban realizando ciertos patrones, así mostró que dos campos magnéticos interactuaban por medio de las líneas de fuerza¹⁴ y no por una extraña acción a distancia. Aunque era verdaderamente ingenioso la idea de Faraday, muchos físicos de aquella época ignoraban sus ideas debido a dos grandes razones: la primera era que la idea sobre las líneas de fuerza se salía de la tradición newtoniana (la más satisfactoria hasta el momento) y la segunda era de que dicha idea de Faraday carecía de la ventaja de una clara formulación matemática que le hubiese hecho más fácil de entender. En el siguiente cuadro se muestra las concepciones que tenían estos dos personajes.

¹³Lo que después sería conocido como cargar positiva y carga negativa respectivamente.

¹⁴Hoy conocidas como líneas de campo.

Concepción de Ampère	Concepción de Faraday
Tenía la creencia de que la electricidad estaba compuesta de dos fluidos de distintos signos, es decir, un fluido positivo y un fluido negativo. Lo que en el momento se conocía como teoría de dos fluidos.	Defendía la existencia de las líneas de fuerza, las cuales, son las que interactúan en la atracción y repulsión entre corrientes eléctricas.
Su explicación teórica estaba basada en la teoría de acción a distancia de Newton, así, su explicación sobre la atracción y repulsión entre corrientes se basaba en el concepto de acción a distancia.	Su explicación se basa en la teoría de campos que él mismo formuló. Sostenía que la repulsión y atracción entre corrientes se debe a la interacción entre los campos magnéticos que generan dichas corrientes.
Creía que la fuerza se pasaba de un cuerpo a otro instantáneamente.	Tenía la creencia que las fuerzas se propagaban con cierta velocidad finita.

Tabla 2-1. Diferencias entre las ideas de Ampère y Faraday.

De esta forma, James Clerk Maxwell (1831-1879), tradujo las ideas de Faraday a un lenguaje matemático preciso, en su monumental tratado publicado en 1873 mostró las ideas de Faraday, generalizó la ley de Ampère para campos variables a través del tiempo¹⁵ y todo lo que se conocía hasta el momento relacionado con electricidad y magnetismo. Lo anterior, lo realizó por medio de una serie de ecuaciones en las cuales Maxwell resume todas las investigaciones de sus predecesores.

2.4. Las ideas ingeniosas de Faraday.

Faraday desde muy joven se sintió atraído hacia la ciencia. Su padre era un herrero y su familia era muy pobre por lo que su estancia en la escuela fue muy breve. Sus padres eran profundamente religiosos, así, desde pequeño fue educado bajo una comunidad religiosa llamada Sandemania, la cual, era una iglesia protestante. Los Sandemanianos, Vivían acorde a la biblia, es decir, respetando las perfectas ideas cristianas de las escrituras. Esta comunidad religiosa, tenía una diferencia respecto al cristianismo tradicional, la cual, era que no se necesitaba intermediarios para la interpretación de las escrituras. Los creyentes de esta comunidad, argumentaban que para encontrar la verdad, lo único que se tenía que hacer era mirar muy cuidadosamente y lo suficientemente cerca, de esta forma, cada quien podría ver la verdad por sí mismo (tagueña, 1988). Así, estas ideas religiosas fueron muy importantes para Faraday, ya que de esta manera, fue como aprendió a confrontar la naturaleza directamente. Sus ideas religiosas era lo que lo impulsaban a descubrir las leyes de la naturaleza por medio de la observación directa y la experimentación y no por escuchar lo que los teóricos decían que se debería encontrar y en donde se debía buscar.

¹⁵Demostrando que el campo que produce un alambre recto por el que fluye una corriente que rota a través del alambre tal y como lo había propuesto Faraday.

Desde muy joven, Faraday soñaba con ser un gran científico. Con ello en mente, empezó a leer diversos libros acerca del método científico y de cómo ser un buen científico, y a replicar los experimentos que estaban a su alcance, al mismo tiempo que asistía a conferencias en donde aprendía a hablar y escribir un buen inglés (Berkson, 1985). En aquel tiempo, a mediados de 1813, Faraday asistía a una serie de charlas que daba uno de los científicos más prestigiosos de la época, sir Humphrey Davy en la Royal Institution. Faraday quedó totalmente asombrado con las conferencias que daba Davy, y cada vez que iba a una conferencia apuntaba todo aquello que veía. Cuando las conferencias finalizaron, Faraday reunió todos los apuntes y se los envió a Davy con la esperanza de que lo contratara para que pudiera trabajar con él. Así, Davy contrató a Faraday como auxiliar de laboratorio. Al poco tiempo, Faraday se convirtió en su ayudante y cuando Davy murió, se convirtió en su sucesor. La gran fuerza impulsadora de Faraday era llegar a desvelar los aspectos fundamentales de la imagen verdadera del mundo (Berkson, 1985). De esta forma, lo que más le importaba a Faraday, era ver cuál teoría parecía más adecuada para explicar satisfactoriamente los resultados experimentales. Por ello, era importante encontrar experimentos cruciales que decidieran cuál concepción del mundo era la correcta.

Respecto a la idea de campo que Faraday introduce para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos, él creía en la existencia del campo, el cual, está constituido por una sustancia material. Faraday no postuló la existencia de un fluido universal para explicar las fuerzas no centrales las cuales él defendía, en vez de ello, realizó una modificación de la teoría de Boscovich introduciendo la hipótesis de que las fuerzas constituyen la única sustancia física (Berkson 1985). La anterior idea, es la clave en la teoría de campos que postuló Faraday tal y como se dijo antes. Ahora tratemos de explicar un poco más detallado la idea de Faraday. En el planteamiento de Boscovich, el espacio estaba compuesto por puntos inextensos y dotados de cierta cantidad de inercia. Así, para Boscovich la existencia de una fuerza representa la tendencia al movimiento, la cual, no tiene localización alguna. A diferencia de Boscovich, Faraday sostiene que la fuerza tiene una existencia real; así para él, toda distinción entre materia y fuerza queda totalmente abolida. Según Faraday, las fuerzas actúan sobre otras fuerzas: se sabe que los cuerpos actúan unos sobre otros, pero si se toma a los cuerpos como sistemas de fuerza,¹⁶ como consecuencia, las fuerzas deben actuar sobre sí. Incluso las fuerzas no actúan a distancia sino sobre otras fuerzas contiguas. De esta forma, la anterior hipótesis llevó a Faraday a la idea de un mar de fuerzas, lo cual, es análogo al mar de materia que había postulado Descartes años atrás (en el cual no había fuerzas) (Tagueña, 1988). Para Faraday, una partícula material era una región en la cual las líneas de fuerzas convergen en un punto. Podríamos resumir lo anterior de la siguiente manera: la fuerza es una sustancia universal que ocupa todo el espacio; a cada punto del campo de fuerzas se le asocia una intensidad y una dirección (Berkson 1985).

Para aquel momento, existía dos clases diferentes de fuerzas, las cuales son las fuerzas de naturaleza atractiva y las fuerzas de naturaleza repulsiva. Las fuerzas atractivas, actuaban solo para cuerpos que se encuentran separados por cierta distancia, es decir, las fuerzas atractivas solo actuaban a distancia y las fuerzas repulsivas actuaban sobre aquellos cuerpos que estaban en contacto. A diferencia de Kant, Faraday creía en la unidad de las fuerzas¹⁷, es decir, que una de las máximas aspiraciones que tenía Faraday era la

¹⁶Tal y como Faraday lo hacía.

¹⁷Todos los tipos de fuerza se pueden transformar en otros.

formación de una teoría de campo unificado. En la teoría de campo de Faraday, hay cuatro importantes ideas que consolidan dicha teoría: la conservación de la fuerza, la unidad de las fuerzas, el efecto de tensión de la fuerza sobre los cuerpos y el rechazo de la acción a distancia (Berkson, 1985). Respecto al primero, el punto clave es la concepción de que la fuerza constituye la única sustancia física, así, en el sistema de Faraday se sostiene que la fuerza no se crea ni se destruye solo se transforma. Respecto a la unificación de la fuerza, considera que todas las fuerzas (eléctrica, magnética, química, gravitatoria, etc.) son la manifestación de una fuerza fundamental, por ejemplo, fuerzas parcialmente diferentes pueden ser diferentes distribuciones espaciales de la fuerza fundamental. Faraday también sostenía que cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo, dicho cuerpo debe sufrir una alteración en su estructura interna, esto es debido a la unidad entre la materia y la fuerza. Así, cómo un cuerpo es un complejo de fuerzas, las fuerzas exteriores deben interactuar con las del cuerpo, por lo tanto, el cuerpo estará en un estado de tensión o de alteración de su estructura (Berkson 1985). Estas cuatro ideas fundamentales reflejan la concepción metafísica de Faraday en relación a la teoría de campos, aunque Faraday no describió matemáticamente estas ideas, fueron de gran inspiración para que otros científicos desarrollaran la teoría de campos en una forma más compacta, es decir, desde un formalismo matemático que le diera solidez a las ideas que proponía Faraday.

2.5. Nuevas hipótesis sobre el ferromagnetismo.

Los trabajos realizados por Faraday y Ampère, impulsaron a muchos investigadores para continuar con la investigación acerca del magnetismo en la materia. Después de la mitad del siglo XIX se empezó a realizar varias investigaciones relacionadas con el tema. Este periodo está marcado por los trabajos de Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) y James Alfred Ewing (1855-1935) en el estudio del ferromagnetismo.

En 1852, Weber propuso un modelo en el cual, las moléculas eran vista como imanes libres de girar alrededor de su propio eje. De tal forma, que cuando se aplicara un campo magnético externo, estos "imanes moleculares" se alinearían con el campo. Weber planteaba que un imán se podía partir indefinidamente y cualquiera de las partes continuaba siendo un imán, incluso en el proceso se podía llegar a la molécula del imán, la cual, conservaría sus polos magnéticos¹⁸. Así, la alineación perfecta explicaba la saturación que se hacía evidente cuando una sustancia no podía ser más magnetizada (Hoddeson, Braun, Teichmann y Weart, 1992). Pero Weber tenía un problema que enfrentar, el cual era, que los experimentos mostraban que la magnetización era proporcional al campo, es decir, que la magnetización de un material solo aumentaba gradualmente hacia la saturación, cuando el campo magnético aplicado aumentaba¹⁹. Para resolver esto, Weber asumió que alguna causa desconocida se oponía al libre movimiento de los imanes moleculares. Sin intentar averiguar el origen de la causa, comparó lo anterior con el efecto restaurador de un torque, obligando a cada molécula a que regrese al lugar originalmente ocupado (Tagueña, 1988). Tal Torque, podía ser producido por un campo magnético que actuaría en cada uno de los imanes elementales²⁰, postulando lo que él llamó "un campo magnético

¹⁸De aquí surge su concepto de imanes moleculares

¹⁹Tal y como Faraday lo había demostrado; entre más intenso es el campo, mayor será el efecto magnético.

²⁰Es decir en cada una de las moléculas.

local" cuya orientación, es la misma que el momento molecular tendría en ausencia de un campo magnético aplicado. Cómo la materia naturalmente se encontraba en un estado desmagnetizado, Weber concluyó que los momentos moleculares estaban distribuidos uniformemente en todas las direcciones, así mismo para el campo local que él postuló (Hoddeson, Braun, Teichmann y Weart, 1992). El campo local que Weber propuso, no le permitía saber nada acerca de la anisotropía que mostraban los materiales ferromagnéticos y solo fue una ayuda artificial para calcular lo que él llamaba el campo magnético total. Lo importante que Weber veía en dicho campo local, era que interactuaba con el campo aplicado y hacía que las moléculas se orientaran en la dirección de dicho campo. Con ello, sugería que cuando la molécula se alejaba demasiado de su posición inicial, cuando se retirara el campo magnético externo, dicha molécula no podría regresar a la posición que antes ocupaba y de esta forma algo de magnetización se retendría. La teoría que Weber planteaba, se basaba en la molécula individual, es decir, Weber no basó sus investigaciones en una acción conjunta. En vez de ello se concentró en entender lo que sucedía con cada molécula cuando se aplicaba un campo magnético externo y cómo se comportaba cuando estaba en un estado sin excitación externa.

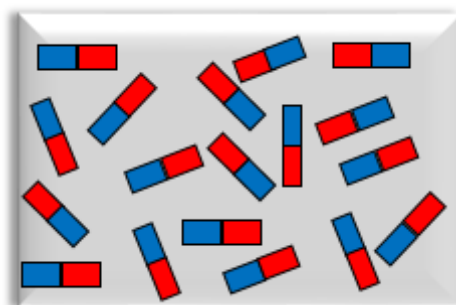


Figura 2-4. Imanes moleculares de Weber distribuidos aleatoriamente.

A mediados de 1885, un destacado físico e ingeniero escocés llamado James Alfred Ewing intentó aplicar la teoría de Weber a sus resultados experimentales, mostrando que dicha teoría era insuficiente para describir adecuadamente los procesos de histéresis magnética. De esta forma, el 1 de enero de 1890, publica un artículo en la Royal Society titulado *contributions to the molecular theory of induced magnetism* en donde describe su nuevo enfoque sobre el ferromagnetismo. En dicho artículo, empieza citando a Maxwell quien señalaba que bajo la teoría de Weber, en donde cada imán molecular era totalmente libre de girar, la más leve fuerza magnética era capaz de poner a las moléculas en un perfecto alineamiento con un campo aplicado, de esta manera, se produciría la saturación magnética. Maxwell en su *treatise on electricity and magnetism vol. 2*, dedica toda una sección a mostrar la teoría de Weber, dicha sección se titula *Weber's theory of induced magnetism*, allí sustenta lo siguiente:

Las moléculas no giran con sus ejes paralelos a la fuerza, esto es, ya sea porque en cada molécula está actuando una fuerza que tienen a preservar su dirección original, o porque un efecto equivalente es producido por la acción mutua del sistema entero de moléculas. Weber adopta la forma más sencilla de estas suposiciones (Maxwell, 1871, p.81).

Ewing en su artículo comenta que Weber suponía una fuerza orientadora que actuaba en la dirección inicial del eje de la molécula y que luego continuaba actuando como una fuerza restauradora en esa dirección después de que la molécula era perturbada. Así, esta

suposición parece ser lo bastante arbitraria puesto que no habría magnetismo remanente²¹ cuando el campo externo fuera removido. Maxwell modifica la teoría de Weber con el fin de que se evitaran las anteriores inconsistencias. Introduce la suposición adicional de que cuando el ángulo de deflexión excede cierto valor límite, la molécula empezaría a tomar una dirección fija (Ewing, 1890). Así, se ve que Maxwell también había seguido la primera posibilidad que seleccionó Weber.

Aunque inicialmente Ewing se había guiado hacia la primera posibilidad tal como lo hicieron Weber y Maxwell, se dio cuenta que la segunda opción era más interesante para analizar el comportamiento molecular en los procesos magnéticos. Esto fue gracias a que él estaba inspirado en algunas ideas que varios físicos habían puesto acerca de la interacción mutua entre moléculas. Una de esas ideas que fue de gran importancia para Ewing, era que una molécula podía ocupar cierta posición gracias a la influencia de sus vecinos y que de esta forma se organizan de tal modo que la energía de interacción sea mínima. Algo interesante que manifiesta Ewing en su artículo, es que materiales tales como el hierro y el níquel, mostraban cierta inestabilidad en los procesos de magnetización y desmagnetización cuando la fuerza magnética alcanzaba cierto valor, la tasa de cambio del magnetismo respecto a los cambios de fuerza se vuelven enormes. Ewing muestra que Arthur Edwin Kennelly (1861-1939) trató de dar un argumento acerca de porque ocurría dicho suceso. Comenta lo siguiente:

El señor A.E Kennelly ha vuelto a la idea de cadenas de moléculas magnéticas unidas por las fuerzas magnéticas intermoleculares y sostiene que cuando dicha cadena se rompe mediante la aplicación de una fuerza magnética externa lo suficientemente fuerte, caerá en pedazos, y los imanes moleculares que componen la cadena se alinearan repentinamente. El comentario del señor Kennelly es muy interesante; pero no creo que la noción de cadenas magnéticas cerradas pueda ser mantenidas cómo una explicación general de la estructura molecular del hierro desmagnetizado (Ewing, 1890, p. 344).

La anterior cita muestra el inconformismo que tenía Ewing respecto a la explicación de cadenas moleculares que sustentaba Kennelly para explicar el problema mostrado en el proceso de magnetización. Así que, se ingenió un experimento que le permitiera sacar algunas conclusiones en cuanto al comportamiento de las moléculas en los procesos de magnetización y de igual forma en el estado desmagnetizado de los materiales ferromagnéticos. Ewing quería ver como las fuerza intermoleculares mantienen el equilibrio en el conjunto de moléculas, así comenta que "un grupo de imanes girando en un plano brinda una buena idea de la naturaleza del equilibrio, el cual es provocado por las fuerzas intermoleculares y la manera en que ese equilibrio se distribuye cuando una fuerza externa se aplica" (Ewing, 1890, p. 345). Él construyó una versión a gran escala del modelo de moléculas magnéticas de Weber. La construcción del experimento lo explica muy cuidadosamente en su artículo (nombrado anteriormente), dicha construcción consistió en lo siguiente: los imanes eran pequeños pedazos de alambre de acero con un décimo de pulgada de diámetro y 3 pulgadas de longitud, los cuales, eran doblados en la mitad con el propósito de que el centro de gravedad estuviera en el punto de soporte del pivote. Dicho pivote, era una aguja de coser puesta verticalmente en una pequeña placa base, la cual, era troquelada a una lámina de plomo; en la figura 2-5 se muestra dicha configuración.

Aunque las pequeñas barras podían girar, lo hacían con cierto grado de fricción. Esta configuración permitía que las fuerzas mutuas fueran más intensas que la fuerza orienta-

²¹Es el magnetismo que mantiene el material ferromagnético.

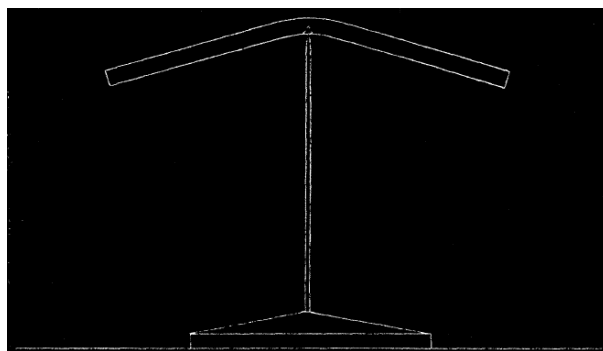


Figura 2-5. *pivote construido por Ewing para su experimento. tomada de Ewing, J.(1890), contributions to the molecular theory of induced magnetism.[figura.1].*

dora del campo magnético terrestre cuando las pequeñas barras estaban moderadamente cerca. El grupo de pivotes era puesto en una tabla, la cual, se introducía en un solenoide que generaba un campo magnético uniforme cuando circulaba una corriente eléctrica a lo largo de él. En ausencia de un campo magnético externo, lo que observó fue que había grupos de pequeñas barras que se orientaban en la misma dirección; de hecho, comenta que si él destruida la configuración, las pequeñas barras se reorganizarían en otras configuraciones diferentes. Lo importante que el destaca es que cada miembro de un grupo era fuertemente controlado por los vecinos adyacente de ese grupo y que cuando se tenía en cuenta todos los grupos que se formaban, el momento magnético neto era igual a cero. De esta forma, Ewing mostró que las moléculas no se organizan en cadenas cerradas. De igual forma, todos los anteriores resultados fueron de importancia para que explicara el comportamiento de las moléculas en ausencia de un campo magnético externo.

Uno de los mayores puntos de interés que tiene Ewing, es el de explicar cómo es el comportamiento de las moléculas magnéticas en el proceso de magnetización de los materiales ferromagnéticos. Así que, hizo circular una corriente eléctrica a lo largo del solenoide de tal forma que generara una fuerza magnética H y así someter a los grupos a la acción de dicha fuerza magnética externa. Lo primero que observó fue una pequeña desviación en todos las pequeñas barras excepto en aquellas que se encontraban a lo largo o contrarias a la dirección de H . Lo anterior, traía como consecuencia un pequeño momento magnético resultante en el grupo. Ewing continúa diciendo:

Supongamos que, sin ir más allá de este punto, removemos H ; los imanes moleculares, no habrán sido deflactados más allá del límite de estabilidad, sencillamente regresan a sus posiciones iniciales y no habrá magnetismo remanente. Esto, de nuevo, está de acuerdo con el hecho de que el magnetismo remanente no es producido por fuerzas de magnetización muy débiles (Ewing, 1890, P. 347).

Lo anterior, muestra por un lado que Ewing está explicando de acuerdo a sus resultados experimentales el proceso de magnetización de los materiales ferromagnéticos y corresponde al estado *a* de la figura 2-6. Así, lo anterior constituye el primer estado en la magnetización de los materiales ferromagnéticos. Por otro lado, es evidente que se basa en la modificación que Maxwell realizó a la teoría de Weber. Cuando empezaba a aumentar el valor de la fuerza, los grupos cada vez se volvían más inestables de esta forma los elementos magnéticos tenderán a orientarse en la dirección de la fuerza magnética. Cuando al final de este estado, removía dicha fuerza lo que observaba era que una gran proporción del momento agregado que el grupo de pequeñas barras había adquirido era mantenido.

Es decir, había una gran cantidad de magnetismo remanente lo cual corresponde al estado **b** de la figura 2-6. De igual forma, en el estado **b**, las moléculas son llevadas dentro de una dirección general como se muestra en la parte derecha en la figura 2-6.

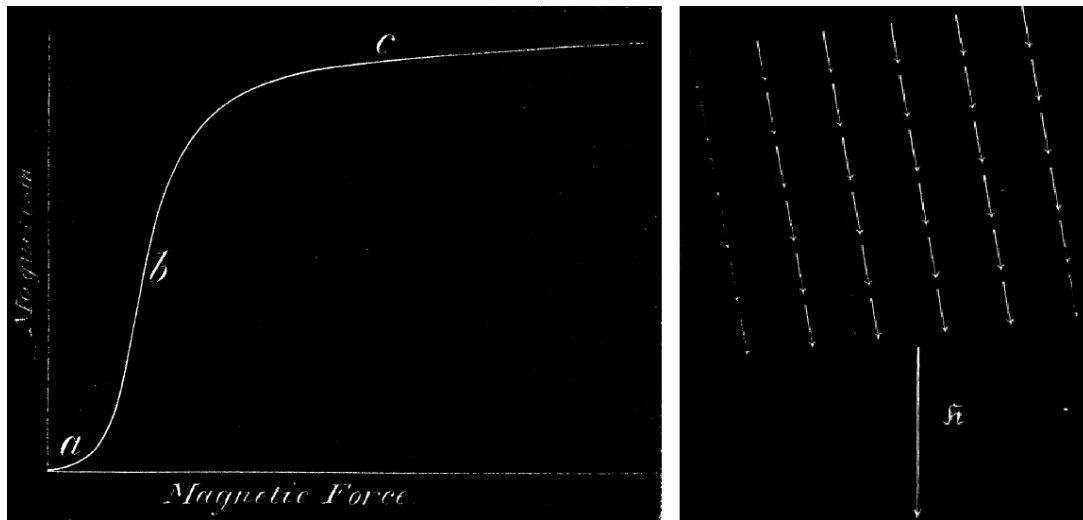


Figura 2-6. Curva de magnetización para materiales ferromagnéticos realizada por Ewing. tomada de Ewing, J.(1890), *contributions to the molecular theory of induced magnetism*. [figura.3].

Ewing concluye que cuando se está en el estado **c** de la figura 2-6, hay un gran acercamiento a la saturación, esto es que las moléculas están mucho más cerca de alinearse con la dirección de H como se observa en la figura 2-7. Algo importante que Ewing muestra es que en algunos grupos la saturación será completada con un valor finito de H , mientras que en otros solo se acercaran a ella. La anterior observación, fue tal vez una de las conclusiones más importantes mostradas en su trabajo, pero Ewing no logró comprender la razón por la cual ocurría esto.

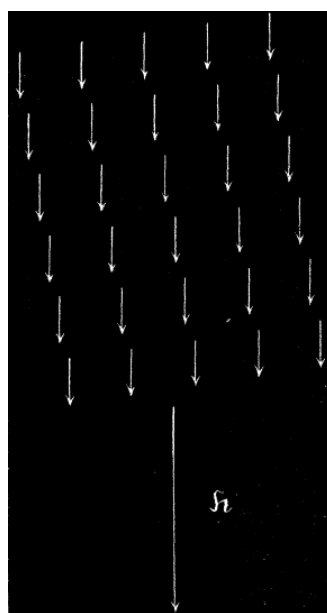


Figura 2-7. Influencia de una fuerza magnética cuando se esta cerca de la saturación. tomada de Ewing, J.(1890), *contributions to the molecular theory of induced magnetism*. [figura.6].

Así el modelo de Ewing reproducía todas las características de la curva de magnetización del hierro y dio claridad al modelo planteado originalmente por Weber con su idea de la interacción mutua entre los imanes elementales. Pero lo verdaderamente importante de Ewing, fue el hecho de que a través de la experimentación que realizó, logró mostrar que el magnetismo es un fenómeno colectivo. Con su arreglo experimental, también logró mostrar por qué el momento magnético neto de los materiales ferromagnéticos era igual a cero, las agujas imantadas que él mismo construyó le ayudaron enormemente para tal fin.

2.6. Curie y sus clasificaciones magnéticas.

Uno de los personajes quizá más importantes en la historia del magnetismo, fue el físico francés Pierre Curie (1859-1906) puesto que recogió todas las ideas teóricas y las observaciones experimentales desarrolladas hasta el momento, con el fin de clasificarlas y complementarlas. En marzo de 1895, Curie publicó su tesis doctoral titulada *propriétés magnétiques des corps a diverses temperatures* en la facultad de ciencias de la academia de París, en dicha tesis Curie aclaró el conocimiento de su tiempo sobre el magnetismo e indicó el camino que otros científicos seguirían para el estudio del magnetismo. Estableció los hechos experimentales realizados por sus predecesores y añadió sus resultados experimentales que había obtenido entre los años de 1892 a 1895 en el laboratorio de la escuela municipal de París de física y química. Desde Faraday, ya era bien conocido que las sustancias con propiedades magnéticas podían ser clasificadas en tres grupos paramagnéticos, diamagnéticos y ferromagnéticos de acuerdo al comportamiento de estos en campos magnéticos.

Curie observó que en las sustancias isotrópicas la magnetización era proporcional al campo aplicado. Teniendo esto en mente, Curie se dio cuenta que la susceptibilidad magnética de esta clase de materiales estaba dada por la relación $M = \chi_m H$ en donde M es el momento magnético por unidad de volumen y H es el campo aplicado. Aunque en su tesis, prefiere hablar de I la cual la llama la magnetización específica, que es el momento magnético por unidad de masa así argumenta que $I = KH$ donde a K lo llama el coeficiente de la magnetización específica (Curie, 1895). continúa sustentando que las sustancias diamagnéticas se caracterizan por tener un coeficiente K negativa; mientras las sustancias paramagnéticas por tener un coeficiente K positivo, pero cuando se remueve el campo magnético externo dichas sustancias pierden completamente su magnetización a diferencia de las sustancias ferromagnéticas que si mantienen una magnetización. En la introducción de su trabajo, Curie hace una serie de preguntas tales como ¿Existen transiciones entre los tres grupos? ¿había una simple causa que pone a un cuerpo particular en una categoría particular? Años atrás Faraday había mostrado que el hierro al rojo vivo no perdía completamente sus propiedades magnéticas, esto lo hizo bajo un arreglo experimental. Precisamente Curie habla de ese descubrimiento que Faraday había hecho años atrás diciendo:

Estas cuestiones preocupaban bastante a Faraday puesto que frecuentemente aparecían en sus memorias. Tenemos sobre este tema una experiencia importante: sabemos desde hace mucho tiempo que el hierro al rojo vivo pierde sus propiedades magnéticas. Faraday demostró que a elevadas temperaturas el hierro sigue siendo magnético, aunque débilmente. Así, el cuerpo puede pertenecer tanto al tercero como al segundo grupo (Curie, 1895,

p.2).

Así, se puede ver que Curie establecía la posibilidad de que un mismo cuerpo podía ser fuertemente o débilmente magnético, mostrando que podía haber una transición entre dos o las tres categorías magnéticas. De hecho, Curie estaba presentando el objetivo de su trabajo:

Desde el punto de vista de las propiedades magnética, los cuerpos se clasifican en tres grupos: los cuerpos diamagnéticos, los cuerpos débilmente magnéticos y los cuerpos ferromagnéticos. A simple vista, estos tres están separados por completo. El objetivo principal de mi trabajo era descubrir si existen transiciones entre estos tres estados de la materia, y si es posible hacer pasar progresivamente un mismo cuerpo por los tres estados. Para ello he estudiado diferentes cuerpos a diferentes temperaturas en campos magnéticos de diversas intensidades (Curie, 1895, p.5).

Por otro lado, las diversas preguntas sobre el origen de los tres fenómenos podían dar lugar a muchas hipótesis. Así que, Curie decidió al igual que Faraday realizar más observaciones, esto debido a que tenía la creencia de "independientemente de cualquier teoría, uno siente que un fenómeno es conocido cuando nuestros conocimientos de los hechos forman un continuo todo" (Curie, 1895, p.2). Así, el reconocer que los fenómenos magnéticos estaban lejos de satisfacer este criterio, fue aquello que lo animó en tratar de construir ese "continuo todo" por medio del estudio de varias sustancias a diferentes temperaturas y campos magnéticos de diversas intensidades. De igual forma, su método experimental, el cual describe con sumo cuidado en su texto, no fue diferente al utilizado por Faraday y Becquerel en la mitad del siglo XIX.

De esta forma, se ve que el interés de Curie era mostrar una clasificación de las sustancias magnéticas de acuerdo a ciertas características mostradas por estas sustancias al ser sometidas a cambios tanto de temperatura como de campos magnéticos. Primero, estudió los cuerpos diamagnéticos, de hecho, en el segundo capítulo de su tesis titulado *cuerpos diamagnéticos*, se dedica específicamente al estudio de sustancias como, el bismuto, el azufre, el yodo, entre otros. El estudio de estas sustancias, le permitieron mostrar que el coeficiente de magnetización específica K , era constante con variaciones de temperatura e intensidades de campo magnético.²² Esta característica, junto con el bajo valor negativo del coeficiente de magnetización, le permitieron establecer una definición más precisa de la clase de sustancias diamagnéticas.

Las sustancias "débilmente magnéticas"²³ que Curie estudió en realidad fueron pocas, realizó algunos experimentos con el gas de oxígeno y con el paladio. En el tercer capítulo de su tesis titulado *cuerpos débilmente magnéticos*, describe las propiedades magnéticas de las sustancias paramagnéticas. Así que, cuando examinó dichas sustancias encontraría uno de los más grandes descubrimientos en toda su vida científica. Curie midió el coeficiente de magnetización del oxígeno cerca de intervalos de temperatura de 500°C, esto le permitiría deducir la primera ley experimental en la historia del magnetismo. De esta manera, Curie escribe "el coeficiente específico de magnetización del oxígeno varía inversamente con la temperatura absoluta" (Curie, 1895, p.52). Curie, no solo obtuvo que el coeficiente específico de magnetización varía con la temperatura, sino que también el coeficiente $(1/k)(dk/dt)$ era igual a $(-1)/T$, entonces si lo anterior era cierto, el coeficiente específico de magnetización K debería variar de acuerdo a la relación $K = A/T$, donde A es

²²Cerca de 14 de las sustancias que estudio le permitieron deducir lo anterior excepto una el bismuto.

²³de esta forma Curie llamaba a las sustancias paramagnéticas.

una constante que depende de la naturaleza del material. Estos resultados los obtuvo para el oxígeno, así que, Curie examinó los resultados de algunos de sus predecesores, suplementándolos con sus propios resultados. Alrededor de una docena de las sustancias con que Curie experimentó, mostraban tener una K que variaba inversamente con la temperatura absoluta, así que, la ley formulada para el oxígeno podía extenderse para este grupo de sustancias, la cual sería útil para caracterizar dichas sustancias. De esta forma, formuló la famosa ley de Curie: la cual establece que la magnetización de un material paramagnético es proporcional a la intensidad del campo magnético dividido por la temperatura absoluta. La constante de proporcionalidad C , sería nombrada después constante de Curie en honor a él.

En cuanto a los materiales ferromagnéticos, que en realidad son pocos, Curie realizó una serie de experimentos con estos materiales de nuevo con un rango más amplio de temperaturas. Clasificó las diferentes formas de hierro de acuerdo a un carácter magnético específico que les asignó a cada una de estas formas. De igual forma, utilizó coordenadas logarítmicas para demostrar la variación del coeficiente de magnetización con la temperatura para estos materiales. Observó que para los otros materiales ferromagnéticos la representación gráfica era la misma que para el hierro, esto le permitió mostrar que, por encima de cierta temperatura, los materiales ferromagnéticos se empezaban a comportar similar a las sustancias paramagnéticas, así que, por encima de esta temperatura característica, la ley que había formulado para las sustancias "débilmente magnéticas" era aplicable para los materiales ferromagnéticos. Actualmente a la temperatura en la cual los materiales ferromagnéticos pierden su magnetismo remanente y empiezan a comportarse como materiales paramagnético, se le conoce como punto de Curie en honor a este gran físico francés.

De esta forma, Pierre Curie mostró que había una relación entre dos de las tres categorías magnéticas, es decir, entre las sustancias ferromagnéticas y las débilmente magnéticas. Al haber desarrollado una ley experimental para las sustancias débilmente magnéticas, fue capaz de reconocer el mismo comportamiento en las sustancias ferromagnéticas por encima de cierta temperatura. Las sustancias diamagnéticas, parecían tener un único carácter magnético que no se relacionaba con las otras dos categorías. Estos resultados experimentales fueron cruciales para la época, ya que, era necesario desarrollar una teoría que permitiera sustentar los resultados que obtuvo Curie. Así, Si tomamos la idea de la integración mutua que propuso Ewing para tratar de explicar los resultados experimentales obtenidos para las sustancias ferromagnéticas, surge la pregunta ¿Qué tipo de interacción mutua puede existir entre las hipotéticas "partículas magnéticas" en una sustancia ferromagnética? (Hoddeson, Braun, Teichmann & Weart, 1992) esta pregunta fue la preocupación de algunos científicos que estuvieron interesados por resolver el misterio del ferromagnetismo.

Capítulo 3

El Ferromagnetismo en el siglo XX.

3.1. Explicación teórica de Langevin

Los descubrimientos experimentales que había realizado Curie, sirvieron de inspiración para que otros científicos continuaran con investigaciones que permitieran explicar los fenómenos magnéticos en la materia. Paul Langevin (1872-1946), quien fue un pupilo de Curie y mantuvo una cercana amistad con él, fue uno de los más interesados en construir una teoría que permitiera explicar los resultados experimentados de Curie. Cuando Langevin empezó la interpretación de los fenómenos magnéticos, tenía a su disposición un marco teórico construido por Lorentz (1853-1928), el cual, se basaba en una nueva concepción de la materia en términos de electrones. Dicho marco teórico junto con las observaciones de Curie, guiaron el trabajo de Langevin. De esta forma, el trabajo de Langevin gira en torno a los fenómenos de paramagnetismo y diamagnetismo y al igual que Curie, termina su trabajo con algunas ideas en torno al ferromagnetismo (Hoddeson, Braun, Teichmann & Weart, 1992).

Langevin basó su teoría en la existencia de un momento magnético, en su artículo publicado en 1905 en *Annales de chimie et de physique* titulado *magnétisme et théorie des électrons*, realiza la explicación del magnetismo con base al movimiento de los electrones dentro de las moléculas. La ecuación de Lorentz hizo posible calcular el campo magnético generado por el movimiento de un electrón. Langevin fue el primero en suponer que los electrones siguen trayectorias cerradas dentro del átomo y de esta forma logró mostrar que las moléculas tienen campos dipolares como los que tienen los imanes. Así, todas las moléculas generaban un campo magnético local, de hecho, Langevin comenta *"creo que es importante notar que este campo puede jugar un importante papel en la orientación mutua de las moléculas que están muy cerca, lo cual, debe ser involucrado en el estudio de la estructura cristalina"* (Langevin, 1905, p.78) así, vemos que Langevin reafirma lo que Weber había dicho unos años atrás.

De acuerdo al marco que había construido, mostró que cuando se colocaba un campo magnético en el lugar ocupado por una molécula, cambiaría el movimiento de los electrones modificando el momento magnético neto y el resultado de esta modificación sería el diamagnetismo. Como el movimiento de los electrones dentro de la molécula no parecía ser afectado por cambios de temperatura, Langevin concluye que el diamagnetismo debe variar muy lentamente con los cambios de temperatura de acuerdo con los resultados

experimentales de Curie.

En cuanto al paramagnetismo, Langevin sabía que este fenómeno dependía de la temperatura. Así, notó que a temperatura ambiente las moléculas no podrían mantener un orden debido a las agitaciones térmicas. Cuando se aplicaba un campo magnético, el movimiento de cada molécula sería cambiado, pero no de la misma forma para todas ellas. Como resultado, las agitaciones de las moléculas comenzarían a reorganizarse y el resultado de dicha reorganización sería el paramagnetismo. Una de las ideas claves en el trabajo de Langevin, fue el uso de la teoría que Boltzmann desarrolló para un gas a temperatura constante porque le permitió calcular una expresión de la magnetización específica en la dirección del campo aplicado a cierta temperatura:

$$I = I_0 \left(\coth a - \frac{1}{a} \right)$$

En donde $a = \mu H/kT$ que es la relación de campo y la temperatura y I_0 es la magnetización específica que tendría una sustancia si N momentos magnéticos moleculares estuvieran alineados en la misma dirección (Hoddeson, Braun, Teichmann & Weart, 1992). De esta forma, Langevin muestra que el momento magnético específico de la sustancia variaría linealmente para bajos valores de la relación a ; así, su teoría permitió explicar la ley experimental de Curie. Langevin creía (al igual que Curie) que el paramagnetismo y el ferromagnetismo compartían el mismo comportamiento y se convenció más de ello con los resultados que obtuvo. Así, explicó dichos fenómenos por medio de un simple proceso: las moléculas poseen un momento magnético cuya orientación por un campo se ve afectada por agitaciones térmicas. Lo que diferencia estos fenómenos, es que a temperatura ambiente las agitaciones térmicas afectan los momentos moleculares en las sustancias paramagnéticas haciendo que los efectos magnéticos sean muy débiles; en cambio en las sustancias ferromagnéticas ocurre lo mismo, pero a cierta temperatura conocida como el punto de Curie (como ya se dijo). Langevin mostró que por encima de este punto las sustancias ferromagnéticas pasan a un ciclo paramagnético.

Así, la teoría de Langevin mostraba y explicaba de forma clara (hasta el momento) ciertos aspectos del paramagnetismo y diamagnetismo. De igual forma, dejaba el camino abierto para que se realizaran investigaciones en torno al ferromagnetismo proponiendo ciertas ideas acerca del fenómeno. Una de las más importantes cuestiones que destacaba Langevin era si Podrían las interacciones mutuas de las moléculas orientar los momentos magnéticos de hierro de una forma ningún campo logró hacerlo en el hierro. Langevin afirmaba que solo dichas interacciones hacían posible la saturación magnética. Él termina concluyendo *"solo uno o unos cuantos pocos electrones contribuyen en la producción de las propiedades paramagnéticas mientras que todos los electrones cooperan en la producción de las propiedades diamagnéticas"* (Langevin, 1905, p. 122).

3.2. Teoría del Ferromagnetismo de Weiss

3.2.1. Los experimentos de Weiss

Los trabajos llevados a cabo por Curie y Langevin fortalecieron la teoría del magnetismo en la materia. Aunque los trabajos de Curie fueron esencialmente experimentales y su

ley surgió como consecuencia de los resultados obtenidos de los experimentos, Langevin estableció una teoría que explicaba y fortalecía los resultados de Curie. El posterior éxito que tuvo la teoría de Langevin, fue grande siendo la mayor guía en el estudio del magnetismo en la materia por aquella época. En el año de 1907, la hipótesis del campo molecular de Weiss permitió dar el siguiente paso en el tema. Dicha hipótesis, fue una consecuencia del trabajo de Langevin y surgió gracias a un largo y dedicado estudio llevado a cabo por Weiss desde 1896.

En su tesis doctoral, presentada en 1896, Weiss pone de presente la inconformidad que sentía con la idea del magnetismo que se usaba en aquella época, dicha idea, planteaba que la magnetización en las sustancias era proporcional al campo aplicado, lo cual, había sido establecido a mediados del siglo XIX ya que, por aquel entonces se pensaba que la materia era magnéticamente isotrópica. La inconformidad de Weiss surgió gracias al estudio con la magnetita encontrando el primer ejemplo de contradicción con dicha idea. Mostró que la magnetita tiene un magnetismo cuya magnitud varía con la dirección del campo y dicha dirección por lo general no es la misma que la del campo. Así, las observaciones realizadas por Weiss sobre la magnetita, fueron de carácter descriptivo que contribuyeron nuevos hechos al estudio del magnetismo en la materia que había elaborado Curie, pero no le ofrecieron ayuda para entender el mecanismo del ferromagnetismo lo cual era el interés principal de Weiss.

Lo que ayudó a Weiss para una primera descripción del ferromagnetismo, fue el estudio con pirrotina.¹ En el año de 1899, Weiss publica un corto artículo titulado *Sur l'aimantation plane de la pyrrhotine* en donde muestra sus primeras observaciones, que se puede resumir de la siguiente manera: colocó un imán en frente de un pedazo de pirrotina, encontrando que si el plano de división del pedazo de pirrotina era perpendicular a las líneas de campo del imán no había atracción, pero si el plano de división contenía las líneas de campo la atracción era muy grande. De hecho, termina concluyendo: "Así, hay una dirección en la cual la magnetización es imposible, permitiendo asumir que el material solo puede magnetizarse en el plano perpendicular a esta dirección, lo cual he llamado el plano magnético" (Weiss, 1899, p.544). Los resultados de la experimentación con este material, fueron de gran importancia para el posterior análisis del ferromagnetismo realizado por Weiss, ya que, con la idea de este plano magnético, Weiss postularía su famoso campo molecular.

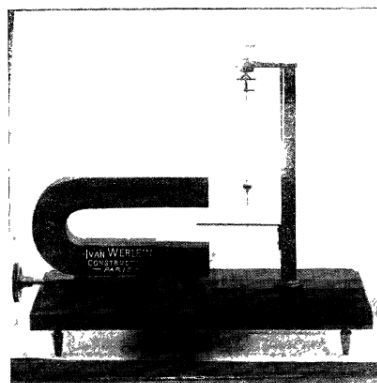


Figura 3-1. arreglo experimental de Weiss para el estudio de la magnetización de la pirrotina. tomada de Weiss, P.(1898), *l'aimantation plane de la pyrrhotine*.

¹Es un mineral poco común, cuya composición principal es sulfuro de hierro.

3.2.2. El campo molecular

Con los resultados que obtuvo de sus experimentos con la pirrotina, Weiss notó que el plano magnético de este mineral era anisotrópico. De esta forma, para justificar los resultados de sus observaciones, Weiss explicó dichos resultados con base en un "campo de desmagnetización" el cual actuaba en la dirección en que la magnetización era difícil. Weiss escribió:

Todo ocurre como si la sustancia anulara, por un fenómeno de desmagnetización, debido a su estructura, una componente del campo proporcional a la componente de magnetización en la dirección de difícil magnetización, y entonces la componente restante era paralela a la magnetización (Weiss, 1899, p.544).

Hasta el momento, se puede ver que Weiss estaba más interesado en la anisotropía de los materiales que en el mecanismo del ferromagnetismo. Sin embargo, en ese momento Weiss empezó a interesarse en algunos aspectos secundarios que le ayudó a tomar un paso decisivo, el cual, le permitió imaginar un campo de origen interno, al igual que el campo de desmagnetización, el cual actuaba en dirección donde la magnetización era fácil.

Weiss trató de recoger estos dos campos en un esquema molecular desde 1902 (Tagueña & Martina, 1988). En su artículo *Les propriétés magnétiques de la pyrrhotine* publicado en diciembre de 1905, propone un modelo que lo ayudó a encontrar una nueva característica de las sustancias ferromagnéticas. Este artículo, no se centraba en el de Langevin publicado en julio del mismo año, en vez de ello, parecía estar inspirado en el modelo de Ewing. Weiss imaginó que el plano magnético estaba compuesto de pequeñas agujas magnetizadas, arregladas en filas paralelas en la dirección de fácil magnetización. Estos pequeños imanes, solo podían interactuar entre ellos si pertenecían a la misma fila. Teniendo la libertad de girar en el plano magnético, todos ellos se alinearían por sí mismo en la dirección de dicha fila. Así, cada elemento magnético estaría sujeto a la acción de un "campo interno" de todos los demás elementos que componen su fila. De esta forma cuando se aplica un campo magnético, todos los pequeños imanes encontrarían un nuevo equilibrio bajo las acciones conflictivas del campo externo, el cual, tiende a hacerlos girar fuera de su fila, y sus vecinos que tienden a mantenerse alineados en la misma dirección de su fila. Por primera vez, un campo anisotrópico interno era asociado con las sustancias ferromagnéticas.

El esquema molecular, le permitió a Weiss completar la laboriosa construcción del "campo interno". Con la publicación de la teoría de Langevin, las ideas de Weiss comenzaron a crecer, de hecho, por aquel entonces Weiss era el más capacitado para continuar con el trabajo de Langevin. Como resultado, Weiss publicó un artículo en *Annales de physique*, dos años después del trabajo de Langevin, titulado *L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique*, en el cual, recogió en un simple concepto, que el llamó "el campo molecular", las características de las interacciones de magnetización entre moléculas, sugeridas por Langevin, y las características del campo anisotrópico interno que el mismo había propuesto (Hoddeson, Braun, Teichmann & Weart, 1992).

En vez de suponer, como lo hice de manera implícita, que el campo molecular es el mismo en todas las direcciones, voy a admitir ahora que la estructura cristalina posee tres planos de simetría rectangulares coincidente con los planos de coordenadas, y que cada una de las componentes del campo molecular es proporcional a la componente correspondiente de intensidad de magnetización con un coeficiente diferente N_1, N_2, N_3 para cada uno de

los tres ejes (Weiss, 1907, P.668).

Esta suposición, le permitió explicar las propiedades de la pirrotina, dando cuenta de los resultados de algunos cuerpos paramagnéticos que se salían de la ley experimental de Curie y finalmente para dar cuenta del ferromagnetismo (Tagueña & Martina, P.15).

Así, respecto a la pirrotina, Weiss sustenta que el vector magnetización I se alinea en la dirección resultante de la superposición del campo molecular y el campo aplicado H ; y si este campo H se limita solamente al plano de magnetización, dicha situación se expresa en una ecuación en términos de los coeficientes N_1, N_2 del campo molecular en dicho plano: $HI \sin(\alpha - \phi) - (N_1 - N_2)I^2 \sin \phi \cos \phi = 0$, en donde α y ϕ son los ángulos entre los eje de fácil magnetización y las direcciones del campo aplicado y la magnetización. Weiss, estableció que $(N_1 - N_2)I = nI$, con el propósito de poder utilizarlo en la teoría de Langevin. La expresión anterior, es la definición matemática de Weiss para el campo molecular h .

Weiss formuló su nueva hipótesis de una manera que la pudiera utilizar para medios isotrópicos, con el simple hecho de remover la anisotropía del campo molecular. Así, solo introduce un campo extra $h=nI$, proporcional a la magnetización, en la teoría del paramagnetismo de Langevin, dejando dicha teoría sin cambio alguno. Lo único que cambió, fue que el campo efectivo H_e estaba dado por la suma del campo aplicado H y el campo molecular h . De esta forma, la magnetización específica, para sustancias paramagnéticas, continuaba obedeciendo la ecuación de Langevin $I = I_0(\coth a - 1/a)$, pero ahora el coeficiente a era $\mu(H + h)/kT$.

Con la hipótesis del campo molecular, Weiss logró explicar algunas de las características que mostraban los cuerpos ferromagnéticos. Sustentaba que, en las sustancias ferromagnéticas, el campo molecular era muy intenso y cuando se sometía dichos materiales a la acción de un campo magnético externo, el campo molecular era el que tendía a alinear los momentos magnéticos vecinos en la dirección del campo magnético externo; siempre y cuando el campo externo H se aplica en el plano de magnetización como ya se dijo anteriormente. De igual forma, la hipótesis del campo molecular, le permitió generalizar la ley de Curie para las sustancias ferromagnéticas. Sabiendo que el campo efectivo H_e para las sustancias ferromagnéticas está dado por la suma del campo aplicado H y el campo molecular h , dedujo la siguiente ecuación $\chi_m = C/(T - T_c)$, la cual, mostraba que la susceptibilidad magnética variaba inversamente con la diferencia entre la temperatura absoluta y la temperatura de Curie. Así, dicha ecuación permitía describir el comportamiento de las sustancias ferromagnéticas por encima del punto de Curie y mostraba la transición de dichos materiales a la fase paramagnética.

3.2.3. Los dominios magnéticos y la magnetización espontanea

Cuando Weiss estableció su hipótesis del campo molecular, se enfrentó al problema de ¿Por qué los materiales ferromagnéticos en estado natural no son magnéticos? Y su teoría debía buscar una respuesta a esta cuestión. De hecho, en su artículo de 1907, dedica unas páginas en aclarar esta cuestión. Los experimentos que realizó con la pirrotina, en específico con el ciclo de magnetización de este mineral, y la corrección de la ley de Curie que el mismo hizo, fueron de gran importancia para la idea que hizo posible explicar la dificultad nombrada. Ya Curie había dicho que los efectos térmicos no permiten que haya un orden magnético en las sustancias, así que, Weiss pensó que si la temperatura fuera

lo suficientemente baja, debería existir una magnetización espontánea², lo cual, creía que era la clave para la solución del problema. Weiss sustentaba que como no había nada que determinara una dirección particular para dicha magnetización, todas las direcciones eran posibles y de hecho sería encontrada en una u otra pequeña región del material, así, estas se podrían cancelar mutuamente por lo que el material en general sería no magnético (todo este razonamiento era en ausencia de un campo magnético externo).

Según Weiss, solo dos valores de magnetización serían encontrados a lo largo de la dirección de fácil magnetización. Así, comenta que: *"Cierta fracción del material es magnetizado en la dirección positiva y el resto en la dirección negativa y es la diferencia la que se observa."* (Weiss, 1907, P.667). Con lo anterior, Weiss quería explicar cómo se mantiene un equilibrio en los materiales ferromagnéticos en ausencia de un campo magnético aplicado. Weiss creía que la dirección de la magnetización espontánea, dependía de la disposición de la estructura cristalina de los materiales ferromagnéticos. De esta forma, asignó una magnetización espontánea a cada "cristal elemental microscópico" que componía la estructura cristalina de los materiales ferromagnéticos y describe al sistema como un complejo de cristales orientados en todas las direcciones. Estas áreas de magnetización espontánea, eran observadas cuando una aleación era examinada a través del microscopio, lo que le dio la confianza a Weiss para dar un paso más grande en el establecimiento de dominio magnético. Establece que, la función de un campo magnético aplicado no es crear magnetización sino hacerla susceptible a la observación comentando que:

No hay diferencia esencial entre un cuerpo magnetizado y un cuerpo que puede ser fuertemente magnetizado. Ambos son magnetizados hasta la saturación; la única diferencia es que, en el primer caso, la magnetización es coordinada y en el segundo es desordenado. (Weiss, 1907, P.685).

Con lo anterior, se puede ver que para Weiss la saturación se alcanza cuando la magnetización espontánea de los diferentes dominios magnéticos se alinea en la dirección del campo. Así, para Weiss la razón por la cual los materiales ferromagnéticos no son magnéticos en estado natural es porque las agitaciones térmicas evitan que haya un orden magnético en estos materiales haciendo que la magnetización espontánea se reparta en dominios los cuales se cancelan unos a los otros haciendo que no haya una magnetización neta. La teoría del ferromagnetismo de Weiss, fue sólida cuando un año después de su publicación, el físico alemán Heinrich Barkhausen (1881-1956) realizó un sorprendente experimento. El demostró que la magnetización de una sustancia ferromagnética, aumenta en una serie de pequeños saltos cuando la sustancia es sometida a un campo magnético que continuamente aumenta. Estas pequeñas variaciones eran detectadas gracias a que inducían una corriente en una bobina que era puesta alrededor de la sustancia ferromagnética, la cual, cuando era lo suficientemente amplificada, producía un sonido en un auricular, lo anterior, se conoce como efecto Barkhausen (Hoddeson, Braun, Teichmann & Weart, 1992).

²Es la magnetización dentro de una sustancia ferromagnética en ausencia de un campo magnético externo.

3.2.4. Problema de la teoría: El origen del campo molecular

Uno de los puntos en los que más se preocupó Weiss después de establecer su teoría del ferromagnetismo, fue en tratar de interpretar el origen del campo molecular. A pesar de que la teoría de Weiss generalizaba la de Langevin y permitía predecir el comportamiento de muchos materiales paramagnéticos que no se ajustaban a la ley de Curie, como se explicó anteriormente, y además de permitir que el ferromagnetismo tuviera una explicación molecular, la teoría de Weiss dejaba abierta la interrogante acerca de qué era el campo molecular, el cual, por otra parte era tremendamente grande en los materiales ferromagnéticos (Tagueña & Martina, 1988). Así, después de publicar su teoría del ferromagnetismo en 1907, empezó a investigar el origen del campo molecular, para finalmente en 1914 mostrar los resultados de su investigación. Weiss pensó que tal vez podía ser abordado si se estudia una sustancia dada a diferentes densidades y por lo tanto encontrar cómo las interacciones producidas por el campo molecular varían como una función de la distancia. Con lo anterior, logró mostrar que las interacciones moleculares decrecen con el recíproco de la sexta potencia de la distancia, lo que indicaba que el campo molecular no podía tener un origen puramente magnético o electrostático.

A pesar de los resultados que Weiss obtuvo, cuando vio que la teoría de los fenómenos dieléctricos que había sido desarrollado por Peter Debye (1884-1966), tenía un número de características en común a la teoría del campo molecular, encontró razonable que los cuerpos magnéticos tienen momentos dieléctricos. Sin embargo, a las ventajas de dicha teoría finalmente fue rechazada, ya que, no se ajustaba a la ley de variación de la sexta potencia de la distancia. En este punto, Weiss termina concluyendo que tal vez el último análisis, que él realizó, da por entender que el fenómeno este dado por fuerzas naturales hasta el momento desconocidas en el círculo científico. Sin embargo, de haber concluido lo anterior en 1914, Weiss volvió a la idea de que los átomos de los metales ferromagnéticos tienen tanto un momento magnético como un momento eléctrico. Así, en 1924, publica un artículo titulado *Un Argument en faveur de la nature électrostatique de champ moléculaire*, en el cual, Weiss defiende que los momentos dipolares que él calculaba mediante una cierta relación, eran del mismo orden de magnitud a los momentos medidos de otras formas. lo anterior, para él era un excelente argumento en favor de un origen eléctrico para el campo molecular. A pesar de sus esfuerzos, no logró mostrar cuál es la causa del campo molecular. Así, su teoría no era suficiente para explicar el ferromagnetismo en su totalidad.

A diferencia de Weiss, muchos otros físicos mantuvieron la mente abierta a la fascinante idea de que el ferromagnetismo fuera producto de fuerzas aún desconocidas, tal y como lo señaló Weiss. No fue hasta el surgimiento de la mecánica cuántica, que se mostró que estas fuerzas desconocidas eran las fuerzas de intercambio, un tipo de interacción que no pudiera haber sido imaginado desde la mecánica clásica.

3.3. Teoría del ferromagnetismo de Heisenberg

Antes de empezar a indagar acerca de la teoría que Heisenberg desarrolló para el ferromagnetismo, es necesario describir brevemente algunos de los supuestos teóricos y experimentos que fueron de gran importancia para el desarrollo del magnetismo y por ende del ferromagnetismo. Vale la pena aclarar que en esta parte solo se hará una peque-

ña contextualización de dichos supuestos teóricos y experimentales, ya que, el principal interés de la presente sección, es describir la teoría del ferromagnetismo que desarrolló Heisenberg.

3.3.1. La nueva mecánica cuántica y el magnetismo

Aunque la teoría del electrón había sido aplicada al magnetismo con cierto éxito, existían algunas inconsistencias en dichos tratamientos. Uno de los ejemplos más notables, era el de porque los átomos poseían un momento magnético; ¿Cuál era la razón por la que los átomos poseen dicho momento magnético? desde la mecánica clásica no fue posible hallar una respuesta coherente, a pesar de que muchos descubrimientos experimentales iban revelando la estructura interna del átomo. En 1900, el físico alemán Max Planck (1858-1947), sugirió su revolucionaria idea de que la materia poseía y emitía energía de forma discreta. Esta nueva idea, del todo extraña para la física clásica, fue la clave para los desarrollos teóricos de la nueva mecánica que comenzó a desarrollarse a principios del siglo XX. De esta forma, una nueva etapa de la mecánica cuántica fue iniciada por Niels Bohr (1885-1962) quien, en 1913, de acuerdo a los desarrollos realizados por Rutherford, propuso que los electrones en el átomo giran alrededor del núcleo sin emitir radiación y que su movimiento está relacionado con la constante de Planck. De igual forma, la transición de un electrón de un estado estacionario a otro venía acompañado de la emisión o absorción de radiación cuantizada. Con esto, la teoría atómica de Bohr, estaba introduciendo el concepto de cuantización por medio de unos postulados que el mismo propuso. En uno de sus postulados, cuantizó el momento angular orbital, el cual, fue de gran importancia para que posteriormente se pudiera cuantizar el momento magnético debido al movimiento orbital del electrón.³

En el año de 1921, Arthur Compton (1892-1962) propuso que el electrón tenía una rotación intrínseca sobre su propio eje y por lo tanto un momento magnético propio además de un momento angular. Lo anterior fue solo predicciones teóricas que surgieron del trabajo de Compton. En el siguiente año, los físicos Otto Stern (1888-1969) y Walter Gerlach (1889-1979) realizaron un experimento, con el cual, confirmaron la existencia del spin. El experimento consistió en hacer pasar un haz de átomos a través de un campo magnético no homogéneo, el cual, se dividía en varios haces mostrando que las partículas elementales tienen un movimiento intrínseco sobre sus ejes. Pero no fue hasta 1925 que dos famosos físicos alemanes George Uhlenbeck (1900-1988) y Samuel Goudsmit (1902-1978), publicaron un artículo en el cual, establecieron definitivamente que el spin del electrón existe y además de ello asignaron un valor para dicho spin el cual es igual a la mitad de la constante de Planck.

Todos los desarrollos mencionados, están asociados a lo que se llama actualmente la mecánica cuántica antigua, en la cual, no existía una dinámica que permitiera deducir las características cuánticas de la radiación y la materia. Lo que se conoce como la segunda fase de la mecánica cuántica, fue iniciada por Louis de Broglie (1892-1987) en 1923, quien sugirió que los fenómenos ondulatorios están asociados con partículas materiales, lo que actualmente se conoce como dualidad onda partícula. De lo anterior, se dedujo que la mecánica cuántica atribuye cualidades ondulatorias a las partículas y propieda-

³Para un mayor detalle del modelo atómico de Bohr y el momento magnético orbital, véase los apéndices C y D

des de partículas a la radiación. Finalmente, la mecánica cuántica florece cuando Werner Heisenberg (1901-1976) y Erwin Schrödinger (1887-1961) establecen sus ecuaciones dinámicas, las cuales unos años después Paul Dirac (1902-1984) generalizó para poder incluir la relatividad de Einstein y el spin de las partículas. La importancia que tuvo la mecánica cuántica en el desarrollo del magnetismo fue muy grande, ya que, por un lado, permitió conectar los fenómenos macroscópicos con las propiedades de los átomos y las moléculas y por otra parte, hizo posible explicar las interacciones entre los portadores elementales del momento magnético, lo cual es de gran importancia para el ferromagnetismo. Lo anterior fue de vital importancia para que Heisenberg desarrollara una teoría con la cual logró explicar el ferromagnetismo.

3.3.2. Discusiones sobre magnetismo de Heisenberg y Pauli

En el desarrollo de la teoría del ferromagnetismo de Heisenberg, el cual duro aproximadamente dos años, Wolfgang Pauli (1900-1958) fue de gran importancia, debido a que, estos dos físicos estuvieron en constante contacto intercambiando ideas acerca de temas relacionados con el magnetismo. De esta forma, a finales del año 1926, mientras Pauli en Hamburgo le escribía a Heisenberg, quien en ese momento se encontraba en Copenhague, acerca de sus desarrollos en el paramagnetismo, Heisenberg le expresaba a Pauli sus reflexiones en el problema del ferromagnetismo.

Heisenberg viajo a Copenhague a la edad de 24 años, con el propósito de dictar una serie de conferencias. En ese momento empezó a trabajar en establecer la conexión entre el principio de exclusión de Pauli y la antisimetría de la función de onda de un sistema de varios electrones (Hoddeson, Braun, Teichmann & Weart, 1992). Como resultado de este trabajo público un artículo, en el cual, tocaba temas como la simetría de la función de onda para sistemas de dos partículas y el concepto de la interacción de canje o “resonancia” como Heisenberg solía llamarlo. Así es como el 4 de noviembre de 1926, Heisenberg envió una carta a Pauli, en la cual, expresa lo que piensa sobre el ferromagnetismo. En esta carta sustenta que:

He estado pensando un poco sobre la teoría del ferromagnetismo. La idea es esta: con el fin de usar la teoría de Langevin del ferromagnetismo, uno debe suponer una gran fuerza de acoplamiento entre los spines de los electrones (solo para estos giros). Esta fuerza debería ser obtenida, como para el helio, indirectamente de la resonancia (Hermann, Meyenn & Weisskopf, 1979, P.353).

En esta nota, se puede ver como Heisenberg estaba tomando dos importantes pasos para su teoría del ferromagnetismo. El primero, fue identificar el spin de los electrones como los momentos magnéticos elementales responsables del ferromagnetismo y el segundo fue darse cuenta de que la interacción de canje podría brindar el fuerte acoplamiento requerido para alinear los momentos magnéticos. Respecto al momento magnético de spin, Heisenberg había estudiado la teoría de Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck, aceptando la hipótesis de que el spin del electrón tenía un momento magnético intrínseco. Diferentes mediciones experimentales, mostraron con gran precisión que la relación giromagnética g era de aproximadamente 2, el cual, era característico de los electrones. Estas mediciones, fueron hechas en materiales ferromagnéticos, logrando así tener todos los datos necesarios para calcular el momento magnético de spin para los materiales ferromagnéticos. La relación del momento magnético y spin, era dada por medio de una ecuación, la cual, fue

establecida en la teoría de Goudsmit y Uhlenbeck.⁴ Para Heisenberg, el concepto de spin era muy importante, puesto que, él creía que en una sustancia ferromagnética solo los momentos intrínsecos de los electrones eran orientados y no el átomo por completo; esto tendría una importancia fundamental en la teoría de Heisenberg.

La idea de las intensas fuerzas internas entre los momentos magnéticos elementales en un material magnético, surgió como consecuencia de la teoría del campo molecular de Weiss. Como ya se vio, dicha teoría se basó en la teoría del paramagnetismo de Langevin de dipolos magnéticos y del trabajo de Ewing sobre fuerzas internas en materiales magnéticos. Para que su teoría concordara con hechos experimentales, Weiss tuvo que asumir *ad hoc*, la existencia de fuerzas que orientan a los átomos en los materiales ferromagnéticos, fuerzas que eran más intensas de las que podían ser explicadas de simples interacciones magnéticas. Con esto en mente, el principal interés de Heisenberg era mostrar que tan fuertes son las fuerzas no magnéticas entre electrones que favorecen el alineamiento entre spin y que dichas fuerzas surgen de la interacción de canje de la mecánica cuántica, de la misma manera como recientemente había mostrado que dicha interacción de canje produce los desdoblamientos de nivel entre electrones en átomos de dos electrones (Hoddeson, Braun, Teichmann & Weart, 1992). En la misma carta del 4 de noviembre, Heisenberg termina diciendo que:

Creo que en general uno puede probar: la orientación paralela de los vectores de spin siempre dan la más baja energía. Las diferencias de energía en cuestión son de orden de magnitud eléctrica, pero decaen con gran rapidez cuando aumenta la distancia. Tengo el presentimiento que en principio esto podría extenderse para dar una interpretación del ferromagnetismo. Para resolver la pregunta del por qué, la mayoría de los materiales no son ferromagnéticos, solo algunos lo son, uno simplemente debe calcular cuantitativamente, y tal vez uno pueda hacer plausible el por qué las circunstancias son más favorables para el hierro, el níquel y el cobalto (Hermann, Meyenn & Weisskopf, 1979, P.353).

La respuesta de Pauli no fue muy favorable, su respuesta fue un poco pesimista. Sin embargo, a Heisenberg se le hacía muy atractiva la idea de que el ferromagnetismo se podía explicar con la interacción de canje. Y fue con ayuda de la interacción de canje y el concepto de spin electrónico, que Heisenberg explicaría el origen tanto del campo molecular de Weiss como de la interacción entre electrones dentro de un dominio magnético en un material ferromagnético.

3.3.3. La interacción de canje en el ferromagnetismo

Heisenberg no publicó su teoría del ferromagnetismo sino hasta mayo de 1928, un año y medio después de que explicara detalladamente sus ideas a Pauli. Dos factores influyeron en su demora para publicar dicha teoría. El primero, fue que, en 1926, él no tenía disponible el contenido teórico necesario para calcular las energías de un sistema de muchos spines en términos de la interacción de canje. Lo cual, por el momento estaba siendo desarrollado por un grupo de científicos alemanes quienes extendieron la descripción de un sistema de dos electrones, que Heisenberg utilizó para estudiar el helio, a un sistema de muchos electrones. El segundo, fue el hecho de que durante este tiempo Heisenberg se encontraba desarrollando los fundamentos teóricos de la mecánica cuántica, desarrollando el principio de incertidumbre tan importante para dicha teoría. De hecho, no fue sino

⁴Para un mayor detalle del spin y momento magnético del electrón véase el apéndice E.

hasta que Heisenberg regresara a Leipzig, en el otoño de 1927, que pudo continuar con el desarrollo de sus ideas en ferromagnetismo. Una vez en Leipzig, se comunicó con un grupo de teóricos expertos para aprender como poder realizar los cálculos de la energía de intercambio de un sistema de muchos electrones.

Heisenberg hizo uso de las cartas que se envía con Pauli, quien ahora se encontraba en Zúrich, para organizar sus ideas sobre el ferromagnetismo; una serie de siete cartas, escritas entre el 3 al 21 de mayo de 1928, permiten ver la etapa final en el desarrollo de su teoría del ferromagnetismo. En la primera carta enviada el 3 de mayo de 1928, Heisenberg le comenta a Pauli que, de las tres aproximaciones disponibles para calcular las fuertes interacciones entre los spines de los electrones, los cuales son: el modelo de electrones libres de Pauli- Sommerfeld, el método de la unión fuerte de Bloch y el modelo de London- Heitler. Heisenberg sustenta que el último es la mejor aproximación que en ciertas circunstancias se puede obtener para el ferromagnetismo, la única condición que se debía hacer es que para el ferromagnetismo la integral de intercambio J debía ser positiva. De esta forma, utilizando este método teórico para obtener una expresión de la energía y despreciando sus fluctuaciones, logró recuperar la fórmula del campo molecular de Weiss para la magnetización, con la única diferencia que la cotangente hiperbólica para spin de $1/2$ desplazaba la función de Langevin en la teoría de Weiss. A pesar de este resultado, el 7 de mayo de 1928, Heisenberg escribe:

Hoy me gustaría continuar con mi trabajo en ferromagnetismo, pero primero escribo sobre las principales objeciones, el principal error que he introducido es que para todos los términos con el mismo momento angular j , habría una energía media en vez de mostrar el valor real (Hermann, Meyenn & Weisskopf, 1979, P.447).

Este comentario, surgió como consecuencia de que Heisenberg en primera instancia despreció las fluctuaciones de energía y como consecuencia de esto obtuvo unos resultados matemáticos que no tenían significado físico alguno. De esta manera, procedió a incluir a las fluctuaciones, utilizando una distribución gaussiana para poder realizar dicho procedimiento. Con esto, llegó a una correcta modificación de la fórmula de Weiss. De igual manera, de acuerdo a sus cálculos, Heisenberg encontró que con un número de vecinos z de al menos 8 se obtenía una magnetización espontánea. Para un z de al menos 6 vecinos, encontró otra solución la cual no tenía un significado físico. Con esto resultados, Heisenberg sustenta que ya se puede entender el ferromagnetismo un poco mejor, de hecho, ese mismo día, envió una corta carta a Pauli, en la cual añadía que z se refería al número de vecinos más cercanos y que el hierro, cobalto y níquel satisfacían su condición de que $z \geq 8$ para el ferromagnetismo de acuerdo a la modificación de la teoría de Weiss.

En marzo de 1928, dos meses antes de la publicación final del trabajo de Heisenberg, el físico soviético Jacov Frenkel (1894-1952) publicó un artículo, en el cual, supuso que un momento magnético espontáneo podía aparecer, como consecuencia de un acoplamiento derivado del fenómeno de resonancia de Heisenberg, entre los momentos de spin individuales de electrones libres. Esta suposición sería de gran importancia para la teoría de Heisenberg, en cuanto a explicar cómo aparecen momentos magnéticos espontáneos en los diferentes dominios magnéticos en un material ferromagnético.⁵

El 10 de mayo de 1928, Heisenberg envió otra carta a Pauli comentando sobre la conveniencia de entender la relación entre su teoría y la teoría del paramagnetismo de

⁵Hoddeson, Out of the Crystal Maze, p.132.

Pauli, ya que, de esta manera, se puede mostrar cómo cambia la interacción de canje para materiales ferromagnéticos con aumentos de temperatura. Tres días después, volvió a enviar una carta a Pauli, en la cual, sustenta que tuvo gran éxito en deducir que la integral de intercambio para los materiales ferromagnéticos es positiva y que para los materiales paramagnéticos y diamagnéticos dicha integral debía ser negativa. Finalmente, después de haber desarrollado todas sus ideas sobre el ferromagnetismo, publicó un artículo en *Zeitschrift für Physik* el 20 de mayo de 1928 titulado *Zur Theorie des Ferromagnetismus*, en dicho artículo recoge todos los conceptos que desarrolló en torno a las discusiones que mantuvo con Pauli tanto de la interacción de canje como del momento magnético de spin. Mostrando que el campo molecular de Weiss se debe a fuerzas de intercambio entre electrones desapareados⁶ de diferentes átomos que solapan sus funciones de onda cuando están relativamente cerca, esto hace que aparezca un momento magnético espontáneo y por ende que exista un campo molecular en cada dominio magnético.⁷ Con esto en mente, termina concluyendo “*cuando los vectores de spin son paralelos, la energía de canje toma un valor mínimo y J toma valores positivos. de este modo, la interacción de canje tenderá a alinear los momentos magnéticos de los átomos próximos; esta es la propiedad característica de los materiales ferromagnéticos (Heisenberg, 1928, p.17).*”

3.3.4. Limitaciones de la teoría

Heisenberg era consciente de las limitaciones que tenía su teoría, de hecho, al otro día de haber publicado su artículo, envió una carta a Pauli en donde le escribe:

bien, he enviado a Scheel (el editor de Zeitschrift) un manuscrito sobre el ferromagnetismo. la suposición de la distribución gaussiana para los cálculos de los valores de energía, en los cuales para temperaturas lo suficientemente bajas conducen a falsos resultados, aún sigue pareciendo insatisfactorio para mí (Hermann, Meyenn & Weisskopf, 1979, P.447).

De esta manera, el mayor problema que mostraba su teoría, era que a temperaturas lo suficientemente bajas, el sistema de nuevo debía convertirse en paramagnético. En lo cual, el no creía que fuera posible que tuviera significado físico alguno, ya que, era un resultado que surgía matemáticamente de la distribución gaussiana que él utilizó para el cálculo de los valores de energía. Con esto, se muestra que Heisenberg creía que el problema era de orden matemático y no físico e inmediatamente se puso al frente de este problema y con un grupo de sus pupilos se puso inmediatamente en realizar las respectivas correcciones matemáticas para poder corregir este error.

Con todo esto, los fundamentos de su teoría estaban terminados hasta este punto; aunque los métodos matemáticos para tratar con los efectos cooperativos en su modelo resultaron ser muy complicados para el tiempo de Heisenberg, logra identificar la base física correcta del ferromagnetismo como un fenómeno cuántico, de esta forma abrió el campo de la teoría cuántica del ferromagnetismo. Así los problemas que quedaron sin resolver, serían en los años siguientes dirigidos por especialistas en el campo. El impecable trabajo que Heisenberg realizó entre 1926 y 1928 sobresale como la primera exploración de las consecuencias físicas de las interacciones electrón-electrón en los sólidos dentro del

⁶son electrones que no tienen su spin compensado por otro electrón de spin opuesto en el mismo átomo.

⁷Para una mayor descripción de la interacción de canje véase la sección 1.2.1 del presente trabajo.

marco de la mecánica cuántica.

Con todas las descripciones que se realizaron, se puso de presente los desarrollos más significativos que tuvo el ferromagnetismo en los siglos XIX y XX. Destacando los primeros conceptos e hipótesis surgidos en relación con el fenómeno, hasta el planteamiento de las teorías que explican las principales características de dicho fenómeno. Cabe aclarar que, para el desarrollo del presente trabajo, se utilizaron algunos textos originales de los autores más representativos del ferromagnetismo. Así, las conclusiones están dadas de acuerdo a lo que se logró interpretar a partir de dichos textos. Con lo anterior, se logró realizar una reconstrucción histórica del ferromagnetismo cumpliendo en gran medida el objetivo general de este trabajo. La reconstrucción histórica que se realizó en los capítulos II y III del presente trabajo, aporta de forma muy significativa la comprensión del fenómeno del ferromagnetismo, ya que se destacaron los autores involucrados en su explicación, los conceptos que aparecieron para explicarlo y la evolución que se realizó hasta finalmente llegar a plantear una explicación desde la mecánica cuántica que permitió dar cuenta de las interacciones atómicas que se dan para que pueda existir el ferromagnetismo.

Conclusiones

Las conclusiones que se mostrarán a continuación serán de dos tipos: en las primeras, se mostrarán los resultados que tuvieron un mayor impacto en el desarrollo del ferromagnetismo durante los siglos XIX y XX. Resultados que permitieron realizar avances en la explicación de dicho fenómeno hasta el establecimiento de la teoría cuántica que permitió entender la mayoría de las características del mismo. Aunque a lo largo del trabajo se resaltaron algunos resultados importantes, aquí se recopilarán dichos resultados, con el fin de mirar su relevancia para el ferromagnetismo. las segundas, van dirigidas a destacar la importancia de textos originales en las reconstrucciones históricas y algunas consideraciones pedagógicas.

Conclusiones de tipo teórico

- Con el establecimiento de su teoría electrodinámica, Ampère estableció una primera hipótesis sobre la magnetización en los materiales ferromagnéticos, que involucraba conceptos moleculares tales como las corrientes amperianas las cuales eran las responsables de dicha magnetización. Lo anterior, junto con el descubrimiento de Faraday de que toda la materia es magnética en cierto grado, impulsaron a muchos investigadores a continuar con el estudio del magnetismo en la materia. Los resultados de Ampère y Faraday, le permitieron a Weber postular el concepto de imán molecular y basar su explicación en torno a dicho concepto. Aunque Ampère propuso un primer acercamiento sobre la magnetización en los materiales ferromagnéticos, su hipótesis no lograba explicar muchas de las características que mostraban dichos materiales, de esta forma, se abrió el camino para estudiar los fenómenos magnéticos en la materia.
- Ewing logró cambiar la forma como se estudiaban los fenómenos magnéticos, apuntando a las interacciones cooperativas entre moléculas como la pieza clave en las propiedades magnéticas de la materia. Esto fue un importante paso para establecer las teorías del ferromagnetismo, puesto que, como se muestra a lo largo de este trabajo, diversos autores utilizaron las ideas de Ewing para continuar realizando desarrollos en la explicación de dicho fenómeno. Por ejemplo, su idea de que las fuerzas magnéticas intermoleculares son suficiente para dar cuenta de los procesos de magnetización, fue de vital importancia en el establecimiento de las fuerzas de canje en la teoría de Heisenberg. Aunque su trabajo daba cuenta del ciclo de Histeresis y la magnetización de los materiales ferromagnéticos, no lograba mostrar cómo era la interacción entre moléculas y cómo estas se comportaban en ausencia de un campo magnético.

- Curie, mostró que el ferromagnetismo y el paramagnetismo están relacionados, estableciendo una transición de fase entre estas dos clases de magnetismo. Esto permitió entender que el paramagnetismo depende de condiciones termodinámicas, que impide que haya un ordenamiento que favorezca al magnetismo de estos materiales. De igual forma, que a cierta temperatura los materiales ferromagnéticos se comportan como materiales paramagnéticos. El trabajo desarrollado por Curie, fue en gran medida experimental, así, logró establecer una ley para el paramagnetismo de acuerdo a sus resultados experimentales, pero no mostró sus resultados experimentales en un marco matemático. Langevin con base a los resultados de Curie, realizó una explicación para el paramagnetismo y dejó algunas ideas para resolver el ferromagnetismo, lo cual, fue de gran importancia para el trabajo que unos años después realizaría Weiss.
- Los experimentos que realizó Weiss, le permitieron dar cuenta de la anisotropía de los materiales ferromagnéticos. Este resultado, fue de vital importancia para su trabajo, ya que, le permitió establecer su campo molecular. Con dicho campo molecular, dio cuenta de las direcciones de fácil magnetización y las direcciones en donde la magnetización era imposible. Así, con ayuda del campo molecular, no solo planteó una teoría sobre el ferromagnetismo, sino que le permitió generalizar la ley de Curie para los materiales ferromagnéticos mostrando así la relación de estas propiedades magnéticas mediante una descripción matemática. El problema en el trabajo de Weiss, estaba en interpretar el origen del campo molecular, que tenía gran relevancia en comprender cómo interactuaban las moléculas en los dominios magnéticos que él mismo propuso.
- Heisenberg en el establecimiento de su teoría, logró mostrar que el ferromagnetismo es un fenómeno, el cual, su explicación se obtiene desde la mecánica cuántica. Dos son los factores que caracterizan el ferromagnetismo: el primero es que el spin del electrón juega un papel importante, ya que, solo cuando en un átomo hay spines desapareados, es posible que exista una interacción entre átomos vecinos, los cuales, deben ser mínimo ocho en los materiales ferromagnéticos; el segundo es que la interacción de canje J se produce entre electrones con el mismo número cuántico de spin haciendo que la energía de intercambio tome un valor mínimo y evitando que los átomos se acerquen demasiado.

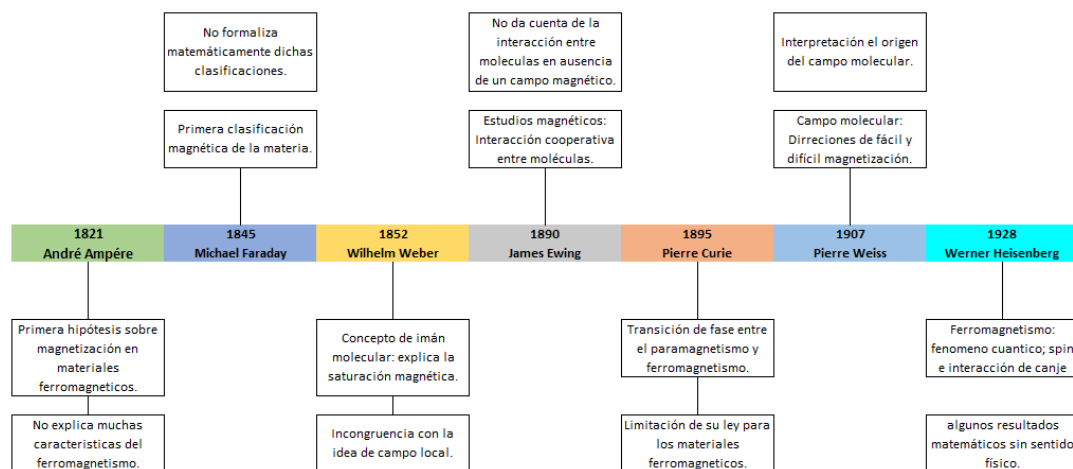
Otro aspecto importante de destacar, es la importancia que tuvo los métodos experimentales por los diferentes autores involucrado en el desarrollo del ferromagnetismo. Construcciones experimentales que reflejan de manera clara las diferentes posturas que se tienen sobre la naturaleza de un fenómeno dado, en nuestro caso del ferromagnetismo. Aunque no todos los involucrados en la explicación de dicho fenómeno realizaron construcciones experimentales en sus trabajos, comparten de alguna forma las ideas y resultados experimentales de sus antecesores. Lo anterior, se hizo evidente a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

En la descripción del ferromagnetismo, fueron dos ideas fundamentales las que movieron los trabajos de los científicos involucrados. Por un lado, estaba la creencia que la propiedad magnética de los materiales ferromagnéticos era debida a las características de las moléculas individuales. Weber fue uno de los que defendía esta idea con mayor fuerza justificando que la interacción de los imanes moleculares con un campo magnético aplicado, era la clave del comportamiento de los materiales ferromagnéticos. Por otra parte,

estaba la idea de las interacciones moleculares como la clave de la propiedad ferromagnética. Ewing fue el mayor defensor de esta idea justificando que la interacción colectiva era importante en la descripción del ferromagnetismo y que dicha interacción estaba más allá de una simple fuerza magnética. De acuerdo a estas concepciones, construyeron algunos experimentos que les permitieron defender sus ideas teóricas los cuales a la vez mostraban ciertos resultados que otros científicos se preocuparían por resolver.

Los experimentos llevados a cabo por Weiss con la pirrotina, dieron de presente que los materiales ferromagnéticos no eran isotrópicos como se tenía pensado hasta el momento. Esto tuvo como consecuencia que se plantean nuevas formas de describir el ferromagnetismo que involucraran conceptos relacionados con dicha anisotropía como la introducción del campo molecular de Weiss el cual solo actúa en los ejes de fácil magnetización y el campo de desmagnetización que describía Weiss. Estos conceptos surgen como consecuencia de sus resultados experimentales los cuales interpretó a la luz de las interacciones cooperativas entre moléculas descrito por Ewing unos años atrás. Resultados de gran importancia para la explicación de Heisenberg que logró dar cuenta de la mayoría de características mostradas por estos materiales. De hecho, dicha anisotropía fue la que permitió dar cuenta sobre la forma en que se forman los dominios magnéticos en ausencia de un campo magnético aplicado.

A continuación, se muestra una línea de tiempo en donde se destaca los aportes más significativos de los autores involucrados en el desarrollo del ferromagnetismo.



Reflexiones pedagógicas y aportes de trabajo

Algo importante de resaltar, es que el análisis de textos originales tuvo una rica utilidad para la descripción histórica, debido a que permitió la reconstrucción de antiguas ideas y como dichas ideas se fueron transformando en otras ideas cada vez más refinadas. De igual manera, permitieron identificar en dónde los autores encontraron problemas al construir conceptos y leyes en torno al ferromagnetismo, y cómo enfrentaron dichos problemas para tratar de encontrar una solución. Por otra parte, permitieron analizar cómo los diferentes autores concebían el ferromagnetismo y en qué herramientas matemáticas, teóricas o epistemológicas se basaron para desarrollar sus trabajos. Con todo esto, fue posible realizar la reconstrucción histórica en los siglos XIX y XX.

Cuando se hace uso de los textos originales en los análisis históricos, se puede dar cuenta de los factores religiosos, morales, intelectuales y culturales que influyeron en el establecimiento de las teorías científicas de los diferentes científicos en una época dada. Lo anterior, tiene un gran impacto en la forma cómo los científicos conciben la ciencia y las polémicas y discusiones que se generan en torno a dichas concepciones. Todo esto, se tuvo muy en cuenta en este trabajo con el fin de realizar una reconstrucción histórica un poco más completa, mostrando que el establecimiento de una explicación del ferromagnetismo, no tuvo una dirección de desarrollo única sino un carácter cambiante y diverso a lo largo de los siglos XIX y XX.

Todo lo dicho anteriormente, tiene una gran ventaja en la enseñanza debido a que permite que los estudiantes conozcan un poco más a fondo los procesos de organización y de experimentación que se realizaron, alrededor del ferromagnetismo, y los contextos sociales en los que se desarrolló. Por otro lado, la historia también ayuda a mejorar la comprensión de los conceptos y las teorías físicas, recrear algunas situaciones y vivencias en relación con una teoría específica y ayuda a promover un entendimiento de las relaciones entre ciencia, cultura y sociedad. Todas estas características, actúan positivamente en comprender mejor una teoría física, en nuestro caso, hace que se entienda un poco más cómo fue el desarrollo de la teoría del ferromagnetismo.

Mirar la historia de las ciencias con una perspectiva educativa permite identificar aportes para la elaboración de propuestas alternativas de enseñanza, con lo cual se busca que el profesor se familiarice con la historia de las ciencias, de tal manera que contribuya en el mejoramiento de la enseñanza de las ciencias y particularmente la enseñanza de la física. De igual forma, el uso de la historia de las ciencias por parte del profesorado, le facilita su labor como docente porque si se conoce todas aquellas ideas que fueron realizadas antes de establecer un concepto en torno a la explicación de un fenómeno y como dicho concepto fue evolucionando hasta cierto momento, hace que la explicación del mismo sea más amena de realizar y por lo tanto posibilita que el estudiante lo entienda de una mejor manera. Por otro lado, el uso de la historia en los procesos de enseñanza alerta no solo a los profesores en ejercicio sino también a los que están en formación, sobre la necesidad de una aproximación fenomenológica de las representaciones científicas con el fin de que dichos profesores sepan orientar a los estudiantes sobre que, con qué y cómo se relacionan esas representaciones científicas y de la forma como los estudiantes pueden confrontarlas con situaciones de sus vidas cotidianas. de igual forma, posibilita que los profesores realicen una enseñanza con una postura más crítica y reflexiva hacia las ciencias. Por último, la historia pone de presente que todas las teorías científicas desarrolladas fueron realizadas por seres humanos como todos lo que ayuda al profesor a mostrar a sus estudiantes que la ciencia no es un imposible como muchos estudiantes suelen creer y que si otros pudieron hacerlo ellos también pueden.

Bibliografía

- [1] FARADAY, M. (1846). *on the magnetic affection of light and on the distinction between the ferromagnetic and diamagnetic conditions of matter.. Philosophical Magazine*, 3(41), 249-258.
- [2] EWING, J. (1890). *contributions to the molecular theory of induced magnetism. Royal Society*, 48(13), 342-458.
- [3] CURIE, P. (1895). *propriétés magnétiques des corps a diverses temperaturas. Cambridge: Harvard College Library*.
- [4] WEISS, P. (1899). *Sur l'aimantation plane de la pyrrhotine.. Annales de physique*, 8(1), 542-544.
- [5] WEISS, P. (1907). *L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. Annales de physique*, 6(1), 661-690.
- [6] LANGEVIN, P. (1905). *magnétisme et théorie des électrons. Annales de chimie et de physique*, 5(8), 70-127.
- [7] HEISENBERG, W. (1928). *Zur Theorie des Ferromagnetismus. Zeitschrift für Physik*, 49, 619-636.
- [8] HERMANN, A & MEYENN, K & WEISSKOPF, V. (1979). *Wolfgang Pauli: Scientific Correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg: 1919-1929. new york: Springer-Verlag, Vol. I*.
- [9] VERSCHUUR, L. (1993). *Hidden Attraction. Oxford: Oxford University Press*.
- [10] TAGUEÑA, J & MARTINA, E. (1988). *De la brújula al espín. El magnetismo. México, D.F: Fondo de cultura económica*.
- [11] HODDESON, L & BRAUN, E & TEICHMANN, J & WEART, S. (1992). *Out of the Crystal Maze: Chapters from the History of Solid-State Physics. Oxford: Oxford University Press*.
- [12] BERKSON, W. (1988). *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein. España: Alianza editorial*.
- [13] CHIKAZUMI, S. (1997). *Physics of Ferromagnetism. Oxford: Oxford University Press*.
- [14] PURCELL, E. (1988). *Electricidad y magnetismo. España: Editorial Reverté*.

- [15] HAYT, W & BUCK, J. (2006). *Teoría electromagnética*. **México D.F**: McGraw-Hill.
- [16] HLAWICZKA, P. (1977). *Introducción a la electrónica cuántica*. **España**: Editorial reverté.
- [17] FEYNMAN, R & LEIGHTON, R & SANDS, M. (1988). *Lecturas de feynman: electromagnetismo y materia*. **México**: Addison Wesley Longman.

Apéndice A

Anexo: Susceptibilidad y permeabilidad magnética.

Hay dos cantidades que nos dan cuenta del campo magnético, la intensidad de campo magnético $\mathbf{H}$ y la densidad de campo magnético $\mathbf{B}$. estas dos cantidades están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (\text{A-1})$$

La relación de estas dos cantidades en el vacío donde la magnetización $M = 0$ esta dada por:

$$B = \mu_0 H \quad (\text{A-2})$$

Donde μ_0 es la permeabilidad del vacío y sus unidades en SI es $4\pi \times 10^{-7} \text{NA}^{-2}$. la ecuación A-1 es válida para todos los materiales magnéticos, cuando los materiales magnéticos son lineales e isotrópicos, la magnetización M depende linealmente de la intensidad de campo magnético H de modo que:

$$M = \chi_m H \quad (\text{A-3})$$

Donde χ_m es una cantidad adimensional conocido como la susceptibilidad magnética del material (la razón de M y H). La cual se podría definir como el grado de sensibilidad a la magnetización de un material influenciado por un campo magnético. Reemplazando la ecuación A-3 en la ecuación A-1 obtenemos que:

$$B = \mu_0 H(1 + \chi_m) \quad (\text{A-4})$$

o

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (\text{A-5})$$

Donde:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

y

$$\mu_r = (1 + \chi_m) = \frac{\mu}{\mu_0}$$

La cantidad μ se conoce como la permeabilidad del material y sus unidades son el Henry/metro. A la cantidad adimensional μ_r se le conoce como la permeabilidad relativa del material y es la razón entre la permeabilidad y la permeabilidad del vacío. Según esto podemos escribir la ecuación A-5, como una relación sencilla entre B y H como:

$$B = \mu H \tag{A-6}$$

Cabe aclarar que la ecuación anterior es la relación entre los campos B y H, para cualquier material magnético, y no la relación entre dichos campo en el vacío, la ecuación A-2 describe la relación de dichos campos en el vacío. La permeabilidad se puede definir como la capacidad de un material o un medio para atraer y hacer pasar por ella un campo magnético.

Apéndice B

Anexo: Magnetización en materiales.

Todos los materiales tienen propiedades magnéticas, en general los materiales no tienen propiedades magnéticas en estado natural. Cuando los materiales son sometidos a la acción de un campo magnético externo, es cuando aparecen ciertas características magnéticas. Hay ciertos materiales fuertemente magnéticos, es decir que reaccionan notablemente cuando se acercan a un imán, y materiales débilmente magnéticos los cuales su reacción cuando están cerca de imanes es muy pequeña.

Cada átomo tiene un momento magnético dado, pero de no aplicarse un campo magnético externo, la suma de los diversos μ (momentos magnéticos) es igual a cero a causa de la orientación aleatoria, como se observa en la figura B-1.

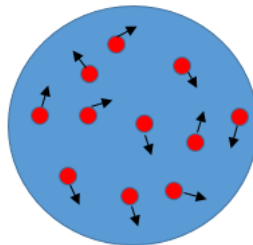


Figura B-1. momentos magnéticos ordenados aleatoriamente en un volumen Δv .

Cuando un material magnético está magnetizado uniformemente, los momentos magnéticos por unidad de volumen es llamado la intensidad de magnetización, aquí lo llamaremos μ_I . Cuando hay momentos magnéticos $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ en una unidad de volumen de un material magnético, la intensidad de magnetización está dada por:

$$\mu_I = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (\text{B-1})$$

Cuando los momentos magnéticos tienen la misma magnitud μ y se encuentran alineados paralelamente unos con los otros, la ecuación anterior se reduce a:

$$\mu_I = N\mu \quad (\text{B-2})$$

Donde N es el número de momentos magnético por unidad de volumen. Se define la

magnetización M (en amperes/metro) como el momento dipolar magnético por unidad de volumen:

$$M = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{\Delta v} \quad (\text{B-3})$$

Se dice que un material esta magnetizado cuando en cualquier punto M no es igual a cero.

Apéndice C

Anexo: Modelo atómico de Bohr.

Los estudios que realizó Joseph John Thomson, quien descubrió el electrón y propuso que estos electrones de carga negativa estaban en una esfera cargada positivamente, y los resultados de Ernest Rutherford, quien estableció que la masa del átomo está concentrado en un punto que denominó núcleo y que además tiene carga positiva, fueron de gran importancia para que Niels Bohr en 1913 propusiera su modelo atómico. Dicho modelo atómico lo resumió en tres postulados:

primer postulado: *Los electrones describen órbitas circulares alrededor del núcleo sin irradiar energía.* según la electrodinámica clásica cuando una partícula cargada se movía con cierta aceleración, irradiaría energía en forma de radiación. Así que esta afirmación era solo una suposición que realizó Bohr. De igual forma para explicar la estabilidad que mantenía el electrón cuando orbitaba alrededor del núcleo, la fuerza coulombiana debe ser igual a la fuerza centrípeta lo que nos da:

$$K \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r} \quad (\text{C-1})$$

Donde Z es el número atómico r es el radio de la órbita y m_e es la masa del electrón. De la ecuación C-1 podemos conocer una expresión para el radio que tendría la órbita:

$$r = K \frac{Ze^2}{m_e v^2} \quad (\text{C-2})$$

De acuerdo con la ecuación de la energía tenemos:

$$E = k + U = \frac{1}{2} m_e v^2 - K \frac{Ze^2}{r} \quad (\text{C-3})$$

De la ecuación C-2 tenemos:

$$m_e v^2 = K \frac{Ze^2}{r} \quad (\text{C-4})$$

reemplazando C-4 en C-3 obtenemos:

$$E = \frac{1}{2} K \frac{Ze^2}{r} - K \frac{Ze^2}{r} = -\frac{1}{2} K \frac{Ze^2}{r} \quad (\text{C-5})$$

la ecuación C-5 es la energía de una órbita para un electrón en función del radio de la órbita.

Segundo postulado: *las únicas órbitas permitidas para un electrón son aquellas en las que el momento angular L del electrón es un múltiplo entero de $\hbar$.*

lo dicho anteriormente se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$L = m_e v r = n \hbar \quad (\text{C-6})$$

Ahora con ayuda de las ecuaciones C-6 y C-2 podremos hallar la ecuación de los radios permitidos a partir de la cuantización:

$$\frac{n^2 \hbar^2}{m_e^2 r^2} = \frac{K Z e^2}{r m_e}$$

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e K Z e^2} \quad (\text{C-7})$$

Donde $n = 1, 2, 3, \dots$ ahora la ecuación C-7 nos muestra que el radio ahora es una magnitud discreta a diferencia del primer postulado. A n se le conoce como el número cuántico principal. de igual forma ahora podemos sustituir la ecuación de los radios permitidos en la ecuación C-5 y así conocer la energía de cada nivel permitido obteniendo:

$$E = -\frac{1}{2} \frac{K^2 Z^2 m_e e^4}{n^2 \hbar^2} \quad (\text{C-8})$$

tercer postulado: *Los electrones solo emiten o absorben energía cuando saltan de una órbita permitida a otra. Así en ese proceso absorbe o emite un fotón donde su energía será la diferencia de energía entre órbitas.*

El enunciado anterior, Bohr lo planteo teniendo en cuenta la ley de Planck, la cual indica que la materia emitía solo cantidades discretas de radiación. de acuerdo a la ecuación $E = h\nu$ así, planteo que la energía estaría dada por:

$$E = h\nu = E_{nf} - E_{ni} \quad (\text{C-9})$$

En donde n_i identifica la órbita inicial, n_f identifica la orbital final y ν es la frecuencia. Remplazando la ecuación C-8 en la ecuación C-9 obtenemos:

$$h\nu = -\frac{1}{2} \frac{K^2 Z^2 m_e e^4}{n_f^2 \hbar^2} + \frac{1}{2} \frac{K^2 Z^2 m_e e^4}{n_i^2 \hbar^2} = \frac{1}{2} \frac{K^2 Z^2 m_e e^4}{\hbar^2} \left[\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right] \quad (\text{C-10})$$

Así la frecuencia que tendrían los fonotes emitidos y absorbidos estarían dados por:

$$\nu = \frac{K^2 Z^2 m_e e^4}{2h\hbar^2} \left[\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right] \quad (\text{C-11})$$

Con estos tres postulados Niels Bohr estableció su teoría atómica. Este modelo atómico estaba basado en el átomo de hidrógeno el cual, lograba explicar el espectro que producía el hidrógeno. Este modelo abrió paso a una nueva era de la física, ya que introducía nuevos conceptos que salía de cualquier teoría clásica.

Apéndice D

Anexo: Momento magnético orbital.

Con el modelo atómico de Bohr se empezó a entender como esta estructurada la materia. De igual manera comenzaban a encajar algunas ideas con otras. Un ejemplo claro de ello es el origen de las corrientes de magnetización que se describieron en el capítulo 1 del presente trabajo. Como el electrón (que es una partícula cargada eléctricamente) gira alrededor del núcleo atómico, genera las corrientes que describía Ampère. Dicho esto consideremos el momento dipolar magnético que genera una carga Q que se mueve en una circunferencia de radio r con una velocidad v tal como podemos ver en la figura D-1.

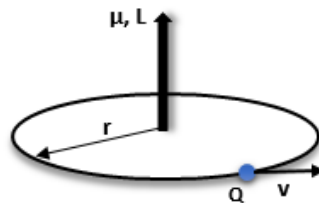


Figura D-1. partícula eléctrica orbitario, con momento magnético μ y momento angular L .

La partícula en movimiento en este caso el electrón, que gira y genera una pequeña corriente y a su vez un momento magnético μ , se puede considerar como una pequeña espira de corriente con momento magnético:

$$\mu = IA \quad (D-1)$$

Donde según la definición la intensidad de corriente es igual al flujo de carga por unidad de tiempo:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Y el tiempo que el electrón invertirá en dar una vuelta estará dado por:

$$t = \frac{2\pi r}{v}$$

Entonces la corriente estará dada por:

$$I = \frac{Qv}{2\pi r} \quad (\text{D-2})$$

Reemplazando la ecuación D-2 en la ecuación D-1 y recordando que $A = \pi r^2$ tenemos que¹:

$$\mu = \frac{Qv}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{Qvr}{2} \quad (\text{D-3})$$

Como la partícula eléctrica es el electrón entonces $Q = -e$ y $v = \frac{p}{m}$ reemplazando estos valores en la ecuación anterior tenemos que:

$$\mu = -\frac{epr}{2m_e} \quad (\text{D-4})$$

Donde m_e es la masa del electrón. Como el vector r y el momento lineal p del electrón son perpendiculares, el producto cruz de estos dos vectores sera:

$$\mu = -\frac{e(r \times p)}{2m_e} = -\frac{e}{2m_e} L \quad (\text{D-5})$$

Donde $L = r \times p$ es el momento angular orbital el cual, según el modelo atómico de Bohr esta cuantizado. Así de acuerdo al segundo postulado del modelo atómico de Bohr tenemos que:

$$\mu = -\frac{e\hbar}{2m_e} n \quad (\text{D-6})$$

Donde:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \quad (\text{D-7})$$

Es conocido como el magnetón de Bohr y constituye la unidad atómica del momento magnético, el cual tiene un valor numérico $9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$

¹asumiendo órbitas circulares según el modelo de Bohr.

Apéndice E

Anexo: Spin y momento magnético del electrón.

El momento angular orbital no es suficiente para describir el momento magnético del átomo. Es necesario describir otra propiedad que tiene el electrón que no tiene nada que ver con el movimiento orbital de este. Dicha propiedad es conocida como spin del electrón, el cual se debe considerar como una característica intrínseca del electrón. Los primeros en introducir este concepto fueron Uhlenbeck y Goudsmit¹ en 1925, con el propósito de describir la estructura hiperfina del espectro atómico. Uno de los experimentos que evidencia esta propiedad del electrón es el realizado por Stern y Gerlach en 1922, donde para justificar el desdoblamiento en dos haces por la acción de un campo magnético variable aplicado transversalmente, era necesario introducir el concepto de spin. En analogía con los resultados obtenidos para el momento angular orbital tenemos que para el spin:

$$S_z = m_s \hbar \quad (\text{E-1})$$

Donde S es el símbolo que se utiliza habitualmente para representar el spin y m_s representa el número cuántico en la componente z de spin, tomando dos únicos valores posibles:

$$m_s = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$$

Teniendo estos valores en cuenta, la ecuación E-1 toma la siguiente forma:

$$S_z = \pm \frac{1}{2} \hbar \quad (\text{E-2})$$

Ahora nuestro interés reside en el hecho, de que a este spin del electrón viene asociado un momento magnético de igual forma que al movimiento orbital del electrón. Anteriormente obtuvimos el magneton de Bohr y señalamos que constituye la unidad atómica del momento magnético. El experimento de Stern- Gerlach mostró que la relación entre el momento magnético y el momento angular, es aproximadamente el doble para el spin que para el magnetismo orbital. Así la constante de proporcionalidad es diferente que en el caso del momento magnético orbital. La componente z del momento magnético de spin viene dada por:

$$\mu_z = -g_s \mu_B m_s \quad (\text{E-3})$$

Donde el factor g_s es conocido como relación giromagnética o de landé y su valor experimental es de aproximadamente 2. Para el momento magnético orbital este factor tiene un valor de 1. El momento magnético de spin tiene una importancia fundamental en las propiedades magnéticas de la materia. Una sustancia ferromagnética, por ejemplo, tiene muchos spines que se alinean espontáneamente para formar así dominios magnéticos. Cuando se aplica un campo magnético externo, dichos dominios magnéticos se alinean también, dando lugar a una magnetización como ya se dijo en secciones anteriores.