

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA**

MAGNETISMO Y UN CAMINO HACIA LO PEQUEÑO

DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO

Ilmo. Sr. D. MANUEL RICARDO IBARRA GARCÍA

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE
CELEBRADO EL DÍA 19 DE DICIEMBRE DEL AÑO 2016*

Y

DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL

Ilmo. Sr. D. RAFAEL NAVARRO LINARES

ACADÉMICO NUMERARIO



ZARAGOZA

2016

Depósito legal: Z-1601-2016

Imprime:

Talleres Gráficos Edelvives

MAGNETISMO Y UN CAMINO HACIA LO PEQUEÑO
POR EL

Ilmo. Sr. D. MANUEL RICARDO IBARRA GARCÍA

Excelentísimo señor Presidente,

Ilustrísimos señores académicos,

Compañeros,

Señoras y señores

Quiero agradecer a los Académicos, el que hayan tenido a bien designarme para ocupar la vacante dejada en la Sección de Físicas por el prof. Manuel Quintanilla, a quien me gustaría dedicar un recuerdo. No tuve la fortuna de disfrutar de sus clases, pero sí de su amistad. Le definiría como un profesor pletórico de entusiasmo, volcado con sus estudiantes y siempre dispuesto a emprender nuevos retos en el campo de la Óptica. Recuerdo sus explicaciones sobre sus queridos hologramas. Siento que no merezco esta distinción y sí, tengo cierto rubor por el reconocimiento que con ella me han hecho mis compañeros. Cuando hace 37 años llegué a esta Facultad de Ciencias nunca soñé con estar hoy en esta situación, simplemente he tratado de cumplir con mi trabajo como profesor e investigador universitario y ahora a mis años, también de emprendedor.

Quiero comenzar mencionando a mi maestro el prof. Agustín del Moral quien me “arrancó” de mi querida Granada con el sueño de una “tierra prometida” donde había un señor, el prof. Domingo González , que producía helio líquido. Fue una de las mejores decisiones que he podido tomar en mi vida. Tuve la suerte de encontrar a compañeros de su grupo: Mi apreciado compañero prof. Rafael Navarro a quien le agradezco su disposición a contestar a este discurso de ingreso y sus contribuciones realizadas en una crítica lectura de esta Memoria. También quiero destacar al prof. Juan Bartolomé, quien me enseñó a soldar acero inoxidable y cobre para poder montar mi primer equipo de vacío. La tarea era ardua, montar un nuevo laboratorio de Magnetismo.

Encontré en esta Facultad de Ciencias un ambiente científico que desconocía y que me ayudó a desarrollar mi Tesis Doctoral. Transcurridos unos años, la morriña de volver a Granada se fue desvaneciendo, pues el apoyo que recibí en esta casa fue siempre excepcional.

Me van a permitir que mi discurso lo desarrolle en varios apartados que creo relevantes como profesor universitario dedicado al Magnetismo y a la Nanociencia:

- 1. La Sociedad científica, un reto actual** **8**
- 2. Una Ciencia en concreto: el Magnetismo** **13**
- 3. Nuestra contribución en Magnetismo** **23**

4. La relevancia de lo pequeño: Nano-magnetismo	26
5. El Instituto de Nanociencia y las nuevas infraestructuras científicas	34
6. La innovación: una nueva visión	36

1. La Sociedad científica, un reto actual

En las sociedades democráticas más adelantadas, los avances científico-tecnológicos proporcionan la base para alcanzar una sociedad más justa, digna y sabia. Estos tres atributos son importantes porque, de otra manera, los grandes avances científico-tecnológicos, de una parte, podrían llegar a ser perversos y de ello existen casos reseñables y flagrantes en la Historia. Por otra parte, un adecuado equilibrio social es necesario para evitar tanto la utilización inadecuada de los conocimientos como su acaparamiento por intereses particulares para facilitar el control social o lucrarse indebidamente.

No cabe duda de que las sociedades democráticas con mayor desarrollo científico son sociedades más productivas y más libres, pero este hecho por sí solo no acrecienta el interés de estas sociedades hacia la Ciencia que debe, al menos, ser percibido y defendido por sus dirigentes. Históricamente ha existido, y pervive hoy, un desencuentro no deseado de la Sociedad con la Ciencia (ausencia de comunicación) debido a la complejidad de sus métodos y conceptos muchas veces alejados de la intuición y de las simplificaciones populistas, donde nada es blanco o negro y todo puede y debe cuestionarse. Sigue siendo una asignatura pendiente explicar más y mejor lo que hacemos los investigadores, pues la Ciencia, básicamente, está financiada por la Sociedad que en épocas de escasez quiere conocer, con más énfasis si cabe, el retorno de sus inversiones en investigación en términos de bienestar social.

Los puentes de comunicación entre la Ciencia y la Sociedad juegan un papel fundamental. No se debe olvidar que vivimos en un mundo globalizado en el que los avances científico-tecnológicos tienen un gran impacto, que multiplica la revolución de las redes sociales como Twitter, Facebook ... facilitada por INTERNET y la utilización cotidiana de dispositivos extremadamente avanzados por una parte creciente de la población mundial. Estas grandes posibilidades de acceso a la información no siempre facilitan la comunicación sino que con frecuencia sirven para admitir, sin crítica alguna, cualquier superchería o irracionalidad. Todo avance tiene sus luces y sombras, formando un equilibrio social “meta-estable” que hemos de inclinar hacia “el lado bueno” de una manera respon-

sable. Como dice Manuel Castell¹ sobre INTERNET: “es mucho más que una tecnología. Es un medio de comunicación, de interacción y de organización social”, la forma en que estos avances sean percibidos y utilizados de una manera responsable, proporcionarán o no mejoras sociales.

Existe un temor ancestral hacia los “monstruos tecnológicos” que puedan surgir de la Ciencia, y no faltan razones para ello ya que la Historia reciente está plagada de aplicaciones terroríficas del conocimiento científico, como fue la utilización de la Física Nuclear para el diseño de la bomba atómica y su uso para concluir la II Guerra Mundial o para estabilizar la división en dos bloques con garantía de destrucción planetaria que indujo la posesión de estas armas en la Guerra fría posterior. Este pecado original del siglo XX sigue teniendo una influencia negativa en el desarrollo de nuevas tecnologías del siglo XXI. Temores similares para la continuidad de la especie humana surgen casi cada vez que se da a conocer un gran avance científico o tecnológico. Así han aparecido con la Robótica, en cuanto sustitutiva del trabajo del hombre y semilla de la Inteligencia Artificial y con la Ingeniería Genética por sus efectos de diezmado de la diversidad o las posibilidades de la guerra bacteriológica. La causas del temor son claras, se demanda un completo control social de estos complejos sistemas que no están libres de sorpresas por la interacción y realimentación entre sus muchas partes y cualquier cambio puede producir efectos en cascada difíciles de predecir. Esperemos que no ocurra lo mismo con la Nanotecnología, aunque el peligro de crear nano-dispositivos destructivos para usos militares o terroristas siempre estará ahí.

La Ciencia es neutral, nadie puede decir que un artefacto doméstico tan útil y cotidiano como es un cuchillo sea “malo”, aunque pueda ser utilizado para amenazar, agredir o matar a una persona. Lo que hace que los artefactos, las tecnologías y los desarrollos científicos sean destructivos y perjudiciales para la Sociedad no es su descubrimiento sino su utilización. Quizás, ahora hay una mayor sensibilidad social a estos usos porque se ha producido un híper desarrollo tecnológico que la Sociedad debe asimilar y compatibilizar con un infradesarrollo institucional y social, sobre el que nos alerta Bill Joy² en su discurso sobre el peligro para la Humanidad de una innovación tecnológica descontrolada en Robótica, Ingeniería Genética o Nano-tecnologías.

1.1. La Universidad foco de la Ciencia: Parámetros objetivos, elitismo vs. democracia

Las Ciencias Naturales no se hacen por consenso. Aunque éste sea necesario para establecer estándares, unidades y protocolos, se construyen con un método y rigor sólo al

¹ Manuel Castell, “La Galaxia de internet” Editorial Areté (2001)

² Bill Joy “Why the future doesn’t need us”, Wired Magazine (April 2000)

alcance de unos pocos. No se pueden negociar ni las hipótesis ni los resultados. Además las Ciencias deben ser predictivas y confirmadoras. Por todo ello, su creación ha sido, es y será esencialmente elitista. No se debe confundir el espíritu democrático de igualdad de acceso que debe presidir nuestras relaciones y derechos como ciudadanos con el reconocimiento al esfuerzo y al mérito por el trabajo desarrollado. Las grandes ideas, que han cambiado el conocimiento, nunca han sido consuetudinarias.

Esta esencia elitista del conocimiento más avanzado, y de la búsqueda de la excelencia de quienes lo crean, impregna la actividad de investigación universitaria. Una Universidad será tanto más reconocida en cuanto sea capaz de generar más conocimiento y de tener en su comunidad más miembros científicamente reconocidos por la Sociedad. Esta reflexión, sí que debería ser de consenso social, pues está en juego el futuro de nuestras universidades que, como escalón superior de la educación, son generadoras de las élites del conocimiento y creadoras del pensamiento científico y crítico. No hay que perderse en disquisiciones organizativas y compensatorias, metodologías trasnochadas y otras consideraciones que buscan una utopía de igualdad, pues no todas las personas tienen la misma capacidad de esfuerzo o idéntico sentido de la responsabilidad. La Universidad como institución debe ser el espejo en el que se refleje la Sociedad, el entorno inmediato en el que nos miremos y la referencia de quienes nos observen, por ello es nuestra obligación dar ejemplo de talento y compromiso social, reconociendo el esfuerzo y el mérito.

1.2. *La excelencia de la investigación y la investigación de excelencia*

Los científicos buscamos entender nuevos fenómenos o analizar los conocidos bajo nuevas hipótesis más comprensivas. Estos *inputs*, unas veces, vienen de logros conseguidos en otros laboratorios o de resultados ya publicados que se profundizan o analizan de forma diferente y otras de los descubrimientos de nuestros laboratorios. La Historia de la Ciencia está jalonada por experimentos decisivos por cerrar o abrir nuevos caminos y su realización es todo un arte que se aprende a base de mucho trabajo, paciencia y pundonor.

La experimentación científica es el fundamento para elaborar nuevas ideas y encontrar nuevos fenómenos y, a su vez, el descubrimiento de nuevos fenómenos o la contrastación de ideas crean la base del desarrollo científico. Así Albert Einstein (1933) en su discurso sobre el Método de la Física Teórica³ niega la posibilidad de conocer el mundo empírico sólo en base a razonamientos lógicos; “*todo el conocimiento de la realidad comienza en*

³ Albert Einstein, “On the Method of Theoretical Physics” (1933) The Herbert Spencer lecture, June 1933 Oxford: “*Pure logical thinking cannot yield us any knowledge of the empirical world; all knowledge of reality starts from experience and ends in it. Propositions arrived at by purely logical means are completely empty as regards reality.*”

la experiencia y termina en ella". Cuando más inesperado sea el resultado experimental, más cerca se está de un gran logro científico. De aquí la belleza de la ciencia experimental, incluso los experimentos fallidos o los resultados no buscados pueden engendrar grandes logros científicos.

La aproximación teórica a la Ciencia y en concreto a la Física, como ejemplo más directo en el contexto de este discurso, tiene su lenguaje en las Matemáticas, y se configura como el arte de establecer modelos explicativos de la realidad que conduzcan a predicciones verificables por toda la comunidad científica en cualquier tiempo y lugar. Galileo (1623)⁴ decía que: "*La filosofía está escrita en ese vasto libro que está siempre abierto ante nuestros ojos: me refiero al universo [...]. Está escrito en lenguaje matemático, y las letras son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible entender una sola palabra*".

Al hablar de Ciencia de excelencia no se hace referencia sólo a la teoría o sólo la experimentación, ambas visiones son necesarias aunque cada vez sea más difícil abarcarlas en un mismo grupo de investigación, requiriendo una colaboración necesaria y difícil, pues en muchas ocasiones los científicos de formación experimental y los de formación teórica han divergido tanto que llega a ser necesario arbitrar lenguajes intermedios incluso en el mismo tema y disciplina científica. Por lo tanto, la diferencia entre lo teórico y experimental es algo a desmitificar, en toda investigación de excelencia.

Otro calificativo/exigencia de la investigación que, actualmente, se está generalizando es la llamada "investigación aplicada" que se pide a los científicos realizar y que ya preocupaba a Ramón y Cajal⁵, que en nombre de la causa del progreso anima a "... *cultivar la Ciencia por sí misma sin considerar por el momento las aplicaciones*." Claramente, esta demanda por el desarrollo de la Ciencia aplicada, siempre tiene su origen en instancias no científicas pero ocupadas de su gestión, en el mejor de los casos refleja la mala conciencia de no haber invertido en Ciencia lo suficiente para poder establecer otro modelo productivo basado en el conocimiento y el desarrollo científico.

La investigación científica puede encontrar aplicaciones y es muy deseable que así sea,

⁴ Galileo Galilei, *Il Saggiatore* (en italiano) Roma (1623)

⁵ Santiago Ramón y Cajal en "Reglas y consejos sobre investigación biológica. Los tónicos de la voluntad" discurso leído con ocasión de su recepción en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, 5 de diciembre de 1897: "*Cultivemos la ciencia por sí misma, sin considerar por el momento las aplicaciones. Éstas llegan siempre, a veces tardan años, a veces, siglos. Poco importa que una verdad científica sea aprovechada por nuestros hijos o por nuestros nietos. Medrada andaría la causa del progreso si Galvani, si Volta, si Faraday, si Hertz, descubridores de los hechos fundamentales de la ciencia de la electricidad, hubieran menospreciado sus hallazgos por carecer entonces de aplicación industrial*".

pero no es imperativo que conduzca a desarrollos tecnológico concretos, si tal fuera los científicos tendríamos poco que hacer. La investigación científica puede ser de buena o de mala calidad y tanto debe evitarse esta última, como la tendencia de simplificar la visión científica sólo a la investigación aplicada. Se debe abordar la innovación y el conocimiento científico puede apoyarla e inducirla.

1.3. *Innovación y Transferencia de conocimientos*

Hoy día, más que nunca, la actividad académica y de investigación universitaria se ve abocada a que el conocimiento generado tenga un reconocible impacto social en términos de innovación y transferencia de conocimientos. La Sociedad mira a sus científicos y les demanda productividad, ello es lógico y lo comparto. Estoy convencido de que el cambio del modelo productivo de nuestro entorno ha de venir de la mano de la utilización de los avances científicos logrados en nuestros centros de investigación, pero hay muchos otros ingredientes sociales y de educación igualmente importantes, que a menudo no se consideran como es fomentar el espíritu crítico, el impulso innovador y el emprendimiento.

La generación de conocimiento de primer nivel en nuestros laboratorios está haciendo de ellos verdaderos “viveros de ideas”, dándoles una mayor capacidad de abordar problemas científicos y de aprender nuevas metodologías, que pueden ser útiles a nuestra sociedad tanto en el aspecto formativo cómo en el de su aplicación industrial.

El impulso a la innovación y a la transferencia de conocimientos no se puede reducir a la búsqueda de aplicaciones específicas; el camino es el inverso, un descubrimiento puede llevar o no a una gran aplicación. El físico Edward M Purcell, premio Nobel de Física 1952 por su trabajo en la resonancia magnética, nunca imaginó que hoy en día las técnicas de imagen por resonancia magnética nuclear fueran una de las técnicas más poderosas de diagnóstico clínico. Los Centros de investigación de la Universidad no deben ser una fábrica de nuevos productos para su próxima comercialización por el entorno industrial, aumentando su competitividad. Como decía Nikola Tesla⁶, uno de los mayores inventores de principio del siglo XX, “*El científico no busca un resultado inmediato. No espera que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para los que vendrán, señalar el camino*”.

⁶ Nikola Tesla THE PROBLEM OF INCREASING HUMAN ENERGY WITH SPECIAL REFERENCES TO THE HARNESSING OF THE SUN'S ENERGY. Century Illustrated Magazine, June 1900, 175-211 (last page) “*The scientific man does not aim at an immediate result. He does not expect that his advanced ideas will be readily taken up. His work is like that of the planter—for the future. His duty is to lay the foundation for those who are to come, and point the way*”

Sin embargo, la transferencia de conocimientos desde el laboratorio de investigación a la Empresa para lograr unos productos nuevos o más competitivos en el mercado es un reto que demanda una sociedad globalizada y tecnológicamente avanzada y que ha de potenciarse desde las instituciones públicas de investigación. Ésto, que es contradictorio con las ideas anteriores de generar conocimiento de primer nivel independientemente de su aplicación, precisa encontrar un equilibrio o compromiso. Y este camino no es fácil, por el gran número de autolimitaciones que impiden la transferencia de conocimientos. Sólo podremos vislumbrar su impacto tecnológico, si los principales agentes sociales Universidad-Gobierno-Empresas se comprometen en retos futuros, confiando y creyendo en la investigación. Se necesita un gran esfuerzo de colaboración y de utilización conjunta de todos los recursos, pues todos son necesarios y ninguno puede excluirse.

En nuestro marco institucional universitario la creación de organizaciones de naturaleza mixta público-privada, como son las fundaciones, en las que además de la Universidad estén presentes otros agentes (Gobierno y Empresas) está permitiendo dinamizar y fomentar aún más dicha colaboración, facilitando el camino.

2. Una Ciencia en concreto: el Magnetismo

Durante muchos años, el Magnetismo ha sido una rama de la Física muy importante tanto por sus aplicaciones como su impacto metodológico y científico en el desarrollo del conocimiento. No debemos olvidar, además, otro aspecto relevante relacionado con la aureola mágica y mística que todavía rodea a los fenómenos magnéticos.

Las propiedades de la magnetita o piedra-imán, mineral de óxido de hierro que se comporta como un imán natural atrayendo el hierro, aparece en escritos griegos que se remontan al siglo VII a.C. y cuya abundancia en la provincia de Magnesia, aparentemente, le dio su nombre⁷. Sin embargo, las aplicaciones remotas de la piedra-imán posiblemente son previas. Ya en China en el 4000 a.C. aparecen referencias a las propiedades de la magnetita y utilizando hierro meteórico, verosímelmente, construyeron la primera brújula entre los años 3000 a 2500 a.C. Menos controvertible es la aplicación de la brújula a la navegación marítima, descrita por primera vez por el científico chino Shen Kuo [1031-1095] y que Alexander Neckham [1157-1217] difundió su uso en Europa, siendo utilizada también para la geomancia Feng Shui (doctrina para alinear los edificios de acuerdo con las fuerzas de la naturaleza).

Petrus Peregrinus de Maricourt [1200-1299] en su manuscrito conocido como “Epistola

⁷ Capítulo I de Daniel C. Mattis, “The theory of Magnetism made simple” Ed. World Scientific (2006) que revisa ediciones anteriores, <http://www.worldscibooks.com/physics/5372.html>

de Magnete” describió sus experimentos con una piedra-imán esférica llamada “terrela”, en los que descubrió las leyes de la atracción y repulsión magnética y estableció las líneas de campo magnético que determinan los “polos” de la esfera.

William Gilbert [1544-1603], nacido después de Nicolás Copérnico y antes que Galileo Galilei, en pleno Renacimiento, es considerado el padre del Magnetismo moderno porque coleccionó el conocimiento existente hasta su época y empezó a aplicar el método científico rompiendo con muchas de las supersticiones previas. Replicó los experimentos Peregrinus y, por primera vez, estableció que la Tierra en sí misma era un imán, idéntico al modelo de la terrela, que interaccionaba y orientaba a aquéllos que se encontraba en su entorno. En su libro: “De Magnete, Magneticisque Corporibus, et De Magno magnete tellure; Physiologia nova, plurimis poribus, et argumentatis et experimentatis demonstrata” publicado en Londres en el año 1600, dio un alto cualitativo y puso las bases del método científico en Magnetismo.

René Descartes [1596-1650] en su obra “Principia Philosophiae” parte IV (1644), hizo del Magnetismo un apéndice de su teoría del Geomagnetismo revindicando la interpretación de todos los fenómenos magnéticos en base a la emergencia de efluvios de la piedra-imán, postulada por Gilbert, pero que para él eran partes roscadas que se conducían por canales agujereados. Estos efluvios salían de la piedra-imán y eran conducidos a través de la Tierra por canales roscados de una sola vía entrando por un polo y saliendo por el opuesto haciendo el camino entre ambos por el aire. En el camino, si encontraban una piedra-imán, abandonaban su destino comenzando a cruzar ésta una y otra vez. La piedra imán y el hierro serían los únicos materiales que poseerían los canales apropiados para acomodar estos efluvios y por lo tanto para experimentar fuerzas magnéticas. La aceptación de esta teoría, carente de base empírica, durante parte del siglo XVII y la mitad del siguiente fue sin duda el mayor efecto negativo de este desvarío que se impuso por el prestigio de Descartes como filósofo.

En segunda mitad del siglo XVIII comenzó el estudio moderno de las propiedades magnéticas de la materia caracterizado por una interrelación flexible entre teoría y experiencia y basada en hipótesis racionales. Ésta vino de la mano del estudio de las propiedades eléctricas de la materia que se hizo en paralelo y con frecuencia por los mismos investigadores en un amplio debate. De un lado, tras la observación de Stephen Gray (1729) de que a través de los metales la electricidad podía pasar de un cuerpo a otro. Benjamin Franklin (1747) estableció su “teoría de un fluido eléctrico”, que posteriormente Franz M Aepinus (1759) la aplicó al Magnetismo. De otro lado, para explicar las atracciones y repulsiones eléctricas Charles François Du Fay (1733) consideró dos clases de fluidos eléctricos “vítreo” y “resinoso” que pueden pasar de un cuerpo a otro cuando estaban en contacto y que se neutralizaban. Esta idea igualmente se tradujo en la hipótesis de dos fluidos magnéticos

“austral” y “boreal” para las interacciones magnéticas enunciada independientemente por Johan C Wilke y Anton Brugmans (1778).

Charles Coulomb [1736-1806], máximo exponente de la teoría de los dos fluidos eléctricos, tras establecer la ley que lleva su nombre para la interacción entre cargas, hizo experimentos con imanes permanentes concluyendo que los fluidos magnéticos, a diferencia de los eléctricos, no podían estar libres. Así, con gran intuición, supuso que estarían ligados a las moléculas elementales, de modo que durante el proceso de imantación cada una de ellas se polarizaría en un cierto grado.

El descubrimiento de la pila eléctrica por Alessandro Volta (1800), hizo posible el establecimiento de corrientes eléctricas a voluntad, abriendo el siglo XIX a una nueva era del conocimiento de los fenómenos magnéticos que dio lugar a una revolución científico-tecnológica.

Aunque previamente existían razones para conectar los efectos eléctricos y magnéticos⁸, Hans Christian Oersted (1813) con su experiencia de deflexión de una aguja imanada por el paso de una corriente eléctrica unió por primera vez y sin ambigüedad los fenómenos eléctricos y magnéticos provocando una inmediata “fiebre” en el estudio de las bases del Electromagnetismo. André-Marie Ampère (1818) los verificó y Jean Baptiste Biot y Félix Savart los cuantificaron (1820) en la ley que lleva su nombre. François J Arago (hacia 1823), por su parte, puso de manifiesto que, “*la corriente actuaba como un imán, atrayendo virtutas y produciendo imanación permanente en agujas de hierro*”, y en colaboración con Ampère aportaron las primeras ideas sobre el origen atómico de las propiedades magnéticas, expresando que “*la existencia de corrientes a escala atómica daría origen a los momentos magnéticos*”.

Los descubrimientos del siglo XIX fueron abundantes en teorías y fenómenos interrelacionados en los campos de la Estructura atómica, de la Termodinámica, y de la Electricidad y Magnetismo, haciendo difícil seguir por separado sus desarrollos. Se ha intentado y en lo que sigue se han recogido sólo los aspectos referentes al Magnetismo y a las fuerzas magnéticas.

Michael Faraday [1791-1867] fue uno de los científicos clave en la comprensión de los fenómenos electromagnéticos: descubrió la inducción electromagnética (1831), introdujo la denominación y el concepto de campo magnético y avanzó en la construcción de la teoría de campos al exponer que las sustancias magnéticas interaccionaban entre sí mediante campos intermedios y no por acción a distancia. Éste concepto del campo magnético le llevó a pensar en su influencia en la luz y tras muchos experimentos en 1845 formuló el

⁸ F. Cajori “A History of Physics” Ed. The Macmillan Company (1890)

efecto que lleva su nombre; rotación de Faraday –giro del plano de polarización de la luz por efecto del campo magnético. Faraday, además, sistematizó los resultados previos de Anton Brugmans de que el cobalto –Co– era atraído por el campo magnético y el bismuto –Bi– y antimonio –Sb– repelidos, estudiando las propiedades de los materiales ordinarios y estableciendo que todos tenían un comportamiento u otro. A aquéllos que se comportaban como el Co los llamó *paramagnéticos* y los que lo hacían como el Bi, *diamagnéticos*.

James Clerk Maxwell [1831-1879] resumió los resultados de Faraday y en 1873 concluyó la formulación moderna de la teoría de campos eléctricos y magnéticos unificándolos en uno, el campo electromagnético. Su síntesis del Electromagnetismo en cuatro ecuaciones que relacionan los campos eléctricos y magnéticos con sus fuentes y entre sí, trajo como resultado la existencia de una solución de las mismas en que los campos eléctricos y magnéticos están acoplados dando lugar a ondas electromagnéticas transversales que se propagan a la velocidad de la luz, predicción que verificó Heinrich Hertz (1888). Finalmente Hendrik Lorentz (1892) completó el Electromagnetismo clásico al establecer las fuerzas que ejercen los campos eléctricos y magnéticos sobre las cargas y corrientes eléctricas.

La aplicación de los desarrollos de Faraday, que dio lugar a la aparición de los primeros generadores, motores y transformadores eléctricos, es sin duda un ejemplo de cómo una investigación de excelencia paso a aplicarse iniciando una cascada de innovaciones tecnológicas, que efectuadas entre 1870 y 1920 contribuyeron a la llamada Segunda Revolución Industrial, que al día de hoy nos ha legado el uso generalizado de la energía eléctrica (la red eléctrica) como el vector energético más importante y eficiente.

2.1. *El Magnetismo de la Materia*

Un paso trascendente en la separación conceptual de causas y efectos, que requería el conocimiento de las posibles fuentes del Magnetismo de la Materia, se dio con el descubrimiento del electrón. Mientras que Faraday, Maxwell y otros, habían intuido que probablemente la carga era discreta, la primera sugerencia al respecto fue de George J Stoney (1874) que le dio nombre en 1891 antes de su descubrimiento por James J Thomson en 1897 en los rayos catódicos, configurándolo como la unidad elemental de transporte de carga $e = 1,602 \times 10^{-19}C$.

En esta misma época Pieter Zeeman (1896) observó que las líneas espectrales emitidas por átomos incandescentes podían descomponerse en multipletes cuando los átomos radiantes estaban sometidos a campos magnéticos intensos lo que cambió muchas hipótesis sobre las estructuras atómicas hechas “ad hoc”. Su profesor, el también holandés Hendrik Lorentz, dio las primeras explicaciones satisfactorias al fenómeno basadas en la teoría del electrón y en la ley de su nombre estableció la fuerza del campo magnético sobre cargas

en movimiento.

Pierre Curie [1859-1906], en su investigación sistemática de las propiedades térmicas de las sustancias magnéticas, concluyó que la susceptibilidad magnética de las paramagnéticas variaba proporcionalmente con el inverso de la temperatura en K (Ley de Curie), mientras que en las diamagnéticas la susceptibilidad presentaba débiles variaciones con la temperatura. Además en los materiales ferromagnéticos (que se comportan como el hierro) encontró incrementos rápidos de la imanación cuando la temperatura era inferior a una dada y característica de cada material, la Temperatura de Curie, mientras que a temperaturas superiores se comportaban como paramagnéticos.

El diamagnetismo fue explicado una década después por Paul Langevin (1905)⁹ como un desarrollo natural de la teoría electrónica que Lorentz utilizó para explicar el efecto Zeeman, mientras que achacó el paramagnetismo a la presencia de átomos con momentos magnéticos permanentes de forma que el campo magnético aplicado lograba orientarlos a pesar de las fluctuaciones térmicas a que estaban sometidos. Aplicando las técnicas de Mecánica Estadística, obtuvo una relación entre la imanación, la temperatura y el campo magnético que para altas temperaturas se reduce a la ley de Curie, comportamiento de fácil verificación experimental.

La primera modelización de los fenómenos magnéticos cooperativos (transición de fase) entre un estado paramagnético desordenado a otro ferromagnético ordenado, a la temperatura de Curie se debe a Pierre Weiss (1907)¹⁰ que formuló la primera teoría moderna del Magnetismo como un fenómeno cooperativo. Para ello se basó en la hipótesis de que la interacción entre momentos magnéticos resultantes de las trayectorias que los corpúsculos describen a grandes velocidades alrededor del resto de del átomo podía describirse por un campo molecular, de origen desconocido, que actuaría sobre cada una de las moléculas orientándolas de forma similar a la que lo hacen los campos magnéticos externos. La aplicación de este campo modificaba los resultados de Langevin, permitía la aparición de imanación espontánea y conducía a una variación de la susceptibilidad magnética a alta temperatura, Ley de Curie-Weiss, que diverge a la temperatura de Curie y que inmediatamente se verificó, era seguida por muchos de los materiales ferromagnéticos.

Esta teoría, que permitía incluir los hechos más característicos de los materiales ferromagnéticos a alta temperatura, sin necesidad de estudiar los mecanismos particulares de cada uno de ellos, centró la investigación en las discrepancias entre los distintos comportamientos experimentales observados, dejando fuera el desconocido origen del intenso campo molecular introducido por Weiss para producir el ordenamiento. Sí que se sabía

⁹ P. Langevin, Ann. Chi. Phys., 8ª serie t V, 70 (1905)

¹⁰ M. Pierre Weiss, J. de Physique, 4ª serie t VI , 661 (1907)

que no podía provenir de interacciones magnéticas entre dipolos magnéticos, ya que en tal caso sólo podrían aparecer ordenamientos magnéticos por debajo de 1 K, por lo que sus orígenes debían estar en nuevos fenómenos de nivel molecular desconocidos.

Los resultados de Niels Bohr y de Hendrika Johanna Van Leuwen (1919)¹¹ sobre la imposibilidad de tener imanación neta en un colectivo de electrones pusieron fin a los estudios clásicos del Magnetismo de la materia. La cuantificación de las órbitas electrónicas posibles del átomo de Rutherford, realizada por Niels Bohr (1911), sugirió que los momentos magnéticos fundamentales debían ser un múltiplo entero de una unidad, que Weiss cuantificó en su magnetón. Aunque incorrecta, esta idea fue retomada por Wolfgang Pauli (1920) dando el valor de la unidad de momento magnético capaz de dar una interpretación física del átomo de Bohr, el magnetón de Bohr, $\mu_B = 9,2732 \times 10^{-24} \text{ J/T}$, magnitud relacionada con constantes físicas fundamentales y unas cinco veces mayor que el magnetón de Weiss.

La proposición de Arthur H Compton (1921) de que el electrón poseía un momento intrínseco, el espín S y un momento magnético añadido debido al momento angular orbital L abrió una nueva perspectiva que demostró el experimento decisivo de Samuel Goudsmit y George E Uhlenbeck (1925)¹², asignando un espín al electrón igual a la constante de Planck h dividida por 4π . No obstante, el momento intrínseco para un electrón era un magnetón de Bohr, valor dos veces superior al debido a una carga que girase (¡alrededor de sí misma!) con el momento angular asignado al espín.

Del estudio del efecto Zeeman anómalo, Alfred Landé (1923) había deducido su fórmula para la razón giro-magnética –factor g – que, aplicada al espín, obligaron a Goudsmit y Uhlenbeck a darle el valor $g = 2$. Situación contradictoria que fue explicada posteriormente por Paul A M Dirac en base a conceptos de Mecánica Cuántica relativista que explican la existencia del espín y que además introducía una nueva interacción entre los electrones de los átomos, el acoplamiento espín-orbita.

La presencia de una estructura hiperfina en las líneas espectrales, llevó a Pauli (1924) a postular la existencia tanto de un momento magnético espinorial y otro momento orbital asociado a los electrones de los átomos como otro o de magnitud muy inferior asociado al núcleo. Las “interacciones hiperfinas” serían la consecuencia de la interacción dipolo-dipolo entre ambos tipos de momentos magnéticos estableciendo un puente entre el Estado Sólido y la Física Nuclear, que se añade a los momentos cuadrupolares nucleares debidos al tamaño finito de los núcleos y a sus desviaciones de la simetría esférica.

¹¹ Argumento formalizado y extendido por J. H. van Vleck, “The theory of electric and magnetic susceptibilities” Ed. Clarendon Press (1932)

¹² S. Goudsmit & G. E. Uhlenbeck, *Naturwiss.* **13**, 953 (1925)

Paralelamente, durante estos años de desarrollo de las teorías cuánticas, el conjunto de datos experimentales en materiales magnéticos aumentó considerablemente. Tras las hipótesis de Weiss (1907) de que un material imanado espontáneamente estaba dividido en dominios magnéticos de forma que minimizase su energía libre, Georg Barkhausen (1919) utilizando los nuevos amplificadores electrónicos de válvulas escuchó los “clics” producidos en un altavoz cuando el campo magnético aplicado alinea los dominios y desplaza las paredes de separación de los dominios, aumentando la imanación del material en su dirección.

En las medidas de la razón giro-magnética de muchos materiales ferromagnéticos se encontró que $g \approx 2$, indicando que en estos sólidos sólo participaban los espines, a diferencia del magnetismo atómico al que contribuyen tanto los momentos orbitales como los espinoriales. En átomos, los datos espectroscópicos acumulados de sus espectros de absorción y de emisión de luz permitieron a Edmund C Stoner (1924) asignar el número adecuado de electrones en cada una de sus capas y a Friederick Hund (1927) enunciar la regla que lleva su nombre concerniente a determinar cuál es el estado espectroscópico fundamental de un átomo o un ion libre y por ende su momento magnético espontáneo asociado.

En el estudio de metales se encontró que formando aleaciones de metales magnéticos (Fe, Co y Ni) con otros no magnéticos se obtenían diferentes materiales con un amplio espectro de propiedades ferromagnéticas interesantes. En ellos se encontró, además que, a diferencia de los materiales aislantes, el número de electrones magnéticos que contribuían por átomo no era un entero¹³.

2.2. *Relevancia de los aspectos cuánticos: la interacción de canje (escenario ideal de la Mecánica Cuántica)*

Conocidas las posibles fuentes del momento magnético; orbital y espinorial, la aplicación de la Mecánica Cuántica y de los métodos de la Mecánica Estadística para la obtención de las propiedades magnéticas macroscópicas, permitió el desarrollo definitivo de las modernas teorías del Magnetismo de la materia.

En este contexto, basándose en espines que interaccionan con sus vecinos y toman valores ± 1 , Wilhelm Lenz (1920) propuso a su alumno Ernst Ising (1925)¹⁴, que en su tesis lo analizara para cadenas lineales, lo que sería el primer modelo paradigmático de Mecánica Estadística para ferromagnetismo, el modelo de Ising. El resultado fue la ob-

¹³ E. C. Stoner, “Magnetism and Mater” Ed. Mathuen (1934)

¹⁴ E. Ising, Z. Physik **17**, 206 (1925)

tención de una solución analítica que demostró la ausencia de transición de fase a campo nulo en una dimensión.

Tras la introducción de las matrices de Pauli, que asignaban carácter vectorial al espín, la necesidad de que las interacciones entre espines fueran escalares llevó a Dirac (1929)¹⁵ a formular el operador producto de los vectores de espín como el ingrediente básico de la interacción magnética.

Werner Heisenberg (1928)¹⁶ basándose en operadores producto de los espines de distintas posiciones formuló su modelo de interacción magnética tridimensional. Consideró además que los coeficientes que multiplicarían estos operadores producto de espines serían función de la energía electrostática de repulsión entre electrones que intervienen dando valores distintos de la energía para sus configuraciones simétricas y anti-simétricas. Este término que aparece como consecuencia de la aplicación del principio de exclusión de Pauli a la función de ondas de todo el sistema, se denomina interacción de intercambio o interacción de canje y es órdenes de magnitud superior a la débil interacción electromagnética directa entre momentos magnéticos dipolares. Poco después, Weiss (1932)¹⁷ reconoció que esta interacción de canje propuesta por Heisenberg daba un resultado equivalente al campo molecular por el introducido, aclarando su origen.

Paralelamente, se conocieron las propiedades de los electrones de conducción, a los que W Pauli (1926)¹⁸ calculó su contribución paramagnética, que está asociada a sus espines y Lev D Landau (1930)¹⁹ dedujo su contribución diamagnética debida a su movimiento orbital. Louis Néel (1932)²⁰ para entender el comportamiento de metales como el Cr y el Mn estableció sus ideas sobre el antiferromagnetismo suponiendo la existencia de subredes de momentos magnéticos que se ordenaban pero de modo que se compensaran dando imanación espontánea nula.

El desarrollo de la teoría de bandas de los sólidos, a partir de 1928, que imponían el requisito de que cada electrón podía moverse en una órbita que se extendía a todo el sólido, hizo difícil su conciliación con las teorías previas de momentos magnéticos localizados y las teorías del Magnetismo de la materia se dividieron en dos: Una para los sistemas con electrones localizados (compuestos iónicos, por ejemplo, que con frecuencia son aislantes eléctricos) –*single ion*– y otra para aquéllos con electrones deslocalizados o itinerantes.

¹⁵ Ver por ejemplo P. A. M. Dirac, *Principios de Mecánica Cuántica*, Ed. Ariel (1967)

¹⁶ W. Heisenberg, *Z. Physik*, **49**, 619 (1928)

¹⁷ P. Weiss, *Ann. de Phys.* **17**, 7 (1932)

¹⁸ W. Pauli, *Le Magnétisme*, Ed. Gauthier Villars (1932)

¹⁹ L. D. Landau, *Z. Physik*, **64**, 129 (1930)

²⁰ L. Néel, *Ann. de Phys.* **17**, 64 (1932)

El resultado experimental acumulado desde entonces indica que en sales iónicas (aislantes eléctricos) que contienen metales de transición $-3d-$ y en unas pocas de sus aleaciones, un modelo localizado proporciona descripciones adecuadas mientras que en los correspondientes metales puros y muchas de sus aleaciones se describen mejor con la teoría de bandas. Con compuestos de tierra raras $-4f-$ el modelo localizado es adecuado tanto para sales iónicas como para metales. En cualquier caso, siempre hay que tener en cuenta que tanto los modelos de electrones localizados como los de electrones itinerantes son dos extremos y que ambos se basan en aproximaciones.

A pesar de las idénticas exigencias de periodicidad espacial implícitas en estado sólido, éstas se ignoran frecuentemente para sistemas con momentos magnéticos localizados utilizando hamiltonianos de espín o hamiltonianos de espín efectivo introducidos por John H Van Vleck (1949)²¹ que sólo describen en cada átomo unos pocos estados próximos al fundamental, simplificando el problema. De este modo una adecuada descripción teórica de su magnetismo requiere:

- (a) Conocer los estados de menor energía de los átomos magnetógenos utilizando un modelo localizado, (de ión aislado) que generalmente se restringe al estudio de los electrones de las capas incompletas “d” o “f” de sus estructuras electrónicas.
- (b) Saber las interacciones presentes entre átomos magnetógenos vecinos –interacciones de canje.
- (c) Dar un tratamiento apropiado al conjunto mediante técnicas de Mecánica Estadística cuántica o clásica.

El conocimiento de la posiciones de los átomos magnéticos en la red cristalina de un sólido iónico es de gran relevancia ya que cada tipo de entorno cristalográfico afecta de forma diferente tanto a su estado fundamental como a sus niveles de energía más próximos. Sus propiedades magnéticas por lo tanto están muy influenciados por los campos eléctricos producidos por los iones diamagnéticos circundantes, es decir de los detalles de su entorno –efectos del campo cristalino– tales como: simetría local y estado de valencia, que determinan su anisotropía.

Las interacciones entre electrones dictan los principales fenómenos físicos y la superconductividad es otro ejemplo de las mismas, aunque en este último caso la energía involucrada es muy inferior a la de los fenómenos de ordenación magnética y, en general, ocurre a temperaturas más bajas y en ausencia de átomos magnetógenos.

²¹ J. H. van Vleck, *J. Chem. Phys.*, **9**, 85 (1949)

La interacción de canje, básicamente tiene su origen en el hecho que dos electrones con spines opuestos, debido al principio de exclusión de Pauli (exigencia de que la función de ondas asociada sea antisimétrica), tienen más probabilidad de estar juntos que si fuesen paralelos, pero la repulsión eléctrica sin embargo es muy elevada, por ello el alineamiento paralelo de los spines electrónicos redundaría en una disminución de la energía electrostática. Esta situación se da en todos los sólidos; sin embargo, no todos tienen el mismo comportamiento magnético, incluso teniendo una configuración electrónica parecida por la distinta interacción de los electrones de cada átomo con su entorno cristalino.

Dependiendo de la estructura cristalina, que dicta los estados electrónicos y la naturaleza del enlace químico de los átomos en el sólido, se pueden presentar varios tipos de interacción de canje que a su vez puede dar lugar a ordenamientos colectivos paralelos o antiparalelos de los momentos magnéticos, *i.e.*, ferromagnetismo o antiferromagnetismo²² entre otras posibilidades:

- **Interacción de canje directa:** Puede aparecer en metales en los que los estados electrónicos se encuentran deslocalizados y se pueden representar por funciones de onda extendidas ocupando estados polarizados en espín. Es el caso de los metales ferromagnéticos más típicos como el Fe, Co y Ni.
- **Interacción de canje indirecta:** Se presenta en sólidos con enlace metálico, en los que los electrones que forman parte del “gas electrónico” que da lugar al enlace, son los responsables de “transmitir” la interacción magnética a otros átomos cuyas nubes de carga están localizadas y no pueden interactuar entre ellas. Éste es el caso típico de los sistemas con metales 4f “tierras raras”. En éstos la capa incompleta que da lugar a un momento magnético es la 4f, que se caracteriza por acumular la densidad de carga electrónica muy próxima al núcleo atómico de manera que quedan “secuestrados”²³ y apantallados por las nubes de carga electrónica debida a los electrones que ocupan orbitales más extendidos espacialmente, como los 5d y 6s, que contribuyen a la banda de conducción. El comportamiento magnético de estos metales se explica en términos de la conocida teoría RKKY²⁴. Ésta establece que la interacción de canje entre los electrones 4f, tiene lugar mediante la interacción intra-atómica de electrones 4f con los electrones de la banda de conducción 5d/6s, esta interacción local da lugar a una polarización de spin de los electrones de la

²² Un libro recomendado: J. M. D. Coey “*Magnetism and magnetic materials*” Cambridge University Press (2009)

²³ J. H. Van Vleck, Rev. Mod. Phys. **50** 181 (1978)

²⁴ M.A. Ruderman & C. Kittel, Phys. Rev. **96**, 99 (1954); T. Kasuya, Prog. Theor. Phys. **16**, 45 (1956); K. Yosida, Phys. Rev. **106**, 893 (1957)

banda de conducción que es oscilatoria, por lo que dependiendo de las distancias interatómicas, la misma, puede ser ferro o antiferromagnética.

- **Interacción de supercanje:** Este tipo de interacción se produce en materiales aislantes, *i.e.*, en aquéllos con todos sus electrones localizados, como es el caso de muchos óxidos de metales de transición, en los que debido a la existencia de hibridación entre los orbitales 3d del metal y los 2p del oxígeno, es posible transmitir la interacción a electrones en otros orbitales 3d de átomos metálicos contiguos. En general esta interacción es antiferromagnética y muy débil.
- **Interacción de doble canje:** Esta interacción, por ejemplo, se presenta en óxidos con iones 3d, cuyos electrones tienen tanto carácter localizado (t_{2g}) como itinerantes (e_g) y están hibridados con los átomos de oxígeno y pueden saltar entre los iones 3d si los momentos magnéticos originados por los electrones del “*core*” atómico (t_{2g}) están orientados paralelamente; sin embargo, este proceso de transferencia electrónica de los electrones e_g no tiene lugar si el alineamiento es antiparalelo. Éste es el mecanismo que origina la magnetoresistencia colosal en las manganitas de valencia mixta, como se verá posteriormente y que relaciona estrechamente movilidad electrónica y ferromagnetismo.

3. Nuestra contribución en Magnetismo

Considero que mi carrera científica se ha desarrollado en un período emocionante en el que la teoría cuántica ya se aplicaba en la materia condensada, y la llegada de nuevas herramientas de observación: difracción de neutrones, espectroscopia Mössbauer, resonancias magnéticas, radiación de sincrotrón, microscopias electrónicas, microscopia de sonda local... han llevado a la Ciencia hacia la investigación interdisciplinar.

La actividad del grupo comienza en 1979 en el campo del magnetismo de compuestos intermetálicos de tierras raras. En ese período, desarrollamos modelos localizados simples de campo cristalino basados en principios de la Mecánica Cuántica que permitieron calcular a nivel macroscópico, las propiedades físicas observadas²⁵. La competición de interacciones físicas: la interacción de canje, los efectos del campo eléctrico de cristal y el acoplamiento spin-órbita podían explicar la magnetización, anisotropía, la expansión térmica, magnetostricción y otras propiedades.

La combinación de la simetría con estados electrónicos en los sólidos magnéticos era

²⁵ M. R. Ibarra, J. I. Arnaudas, P. A. Algarabel, A. del Moral, “Crystal field effects on polycrystalline (rare earth) Ni₂ intermetallic compounds”, *J. Magn. & Magn. Mat.*, **46**, 167- 177 (1984)

la motivación más importante en nuestra investigación. Es fascinante comprobar cómo técnicas muy sencillas de laboratorio podrían dar información relevante, pero también lo poderoso que es la combinación de instrumentos más sofisticados. El primer ejemplo que puedo citar, es la comparación de la información obtenida a partir de las medidas de la deformación de red en un monocristal de una aleación de aluminio y holmio (HoAl_2) con la procedente de medidas espectroscópicas utilizando dispersión inelástica de neutrones²⁶. Se desarrolló un gran actividad en el campo de la anisotropía magneto-cristalina y magnetostricción de intermetálicos de tierras raras, fueron unos años en que la comunidad científica relacionada con el Magnetismo se había volcado en conocer los mecanismos de interacción magnética que hacían de estos materiales los mejores imanes permanentes (caso del Nd-Fe-B) y de máxima magnetostricción (Terfenol, Tb-Dy-Fe). Estas investigaciones permitieron explicar y predecir el comportamiento de la anisotropía magneto-cristalina mediante la utilización de modelos de campo medio (campo molecular) basados en la simetría cristalina simplificada en modelos tipo “ion aislado”.

También me gustaría destacar la reciente contribución en el campo de las aleaciones de tierras raras con efecto magneto-calórico gigante ($\text{Gd}_4(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_5$). Estos sistemas son muy prometedores por sus posibles aplicaciones en refrigeración magnética. La existencia de transiciones de fases magneto-estructurales produce grandes cambios en la entropía. La actividad que se desarrolló nos permitió comprender el origen del comportamiento magnético y la explicación de los complejos diagramas de fase magnéticos y estructurales que se encuentran en estos compuestos.

3.1. Llegaron las manganitas

En 1993, R. von Helmholt durante sus investigaciones de doctorado en Siemens descubrió la magnetoresistencia colosal en manganitas²⁷. Un año más tarde, visitó el Instituto de Ciencia de Materiales y dio una charla sobre su reciente hallazgo, que dio lugar a un nuevo campo de investigación “La magnetoresistencia colosal”. Durante la visita a nuestro laboratorio, nos explicó la importancia de la existencia de valencia mixta sobre los iones Mn en los óxidos ferromagnéticos con estructura tipo perovskita $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$. Los estados electrónicos asociados a los iones Mn_3^+ y Mn_4^+ juegan un papel importante dado que comparten un electrón (tipo e_g) y originan un estado deslocalizado con alta polarización de espín. Éstos son los ingredientes esenciales del estado conductor y ferromagnético

²⁶ M. R. Ibarra, E. W. Lee, A. del Moral, O. Moze, “Magnetic anisotropy and spin reorientation in HoAl_2 ” *Solid St. Comm.*, **53**, 183-186 (1985)

²⁷ R. von Helmholt, J. Wecker, B. Holzapfel, L. Schultz, K. Samwer, “Giant negative magnetoresistance in perovskite like $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_x$ ferromagnetic films” *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2331 (1993)

que se alcanza cuando el material sufre una transición de fase desde el estado aislante y no-magnético de alta temperatura. Es decir, existe un estado de alta movilidad electrónica (ferromagnético-conductor) que puede alcanzarse mediante enfriamiento del material por debajo de una temperatura crítica o bien aplicando un campo magnético, lo que produce cambios de resistencia dos órdenes de magnitud superiores a la mayor magnetorresistencia conocida hasta ese momento. Como se conocía la magnetorresistencia gigante, descubierta en el grupo de Albert Fert, a esta se le denominó magnetorresistencia colosal.

Nuestro interés en este campo comenzó con una mala comprensión de sus explicaciones. En ese momento habíamos realizado investigaciones del efecto INVAR en el que el orden magnético y la itinerancia electrónica originan grandes efectos de volumen²⁸²⁹. Nos propusimos medir la expansión térmica y magnetostricción en las manganitas de valencia mixta. Nuestra hipótesis de partida resultó ser errónea, pues la valencia de los iones de manganeso es mixta pero fija, es decir no había un cambio en la densidad de estados o valencia fluctuante, que es la responsable de cambios de volumen en un cristal. No obstante, en las medidas de magnetostricción? y observamos un comportamiento extraordinariamente anómalo en la fase de alta temperatura y que propusimos como responsable de la magnetorresistencia colosal (CMR).

En 1995 publicamos nuestros primeros resultados de estos compuestos en *Physical Review Letters*³⁰, explicando los efectos de volumen anómalos observados en la fase paramagnética en términos de localización y deslocalización de portadores por el efecto del campo magnético. Ésto fue muy sorprendente, ya que toda la literatura publicada hasta ese momento señalaba la fase ferromagnética como la fuente de la CMR. Estos experimentos pioneros se completaron con otros de dispersión de pequeño ángulo de neutrones, lo que permitió dar una explicación de la fenomenología de la CMR y establecer que la naturaleza intrínseca de este efecto está asociada con la formación de “polarones magnéticos” en la fase paramagnética. Este trabajo fue publicado en la revista *Nature*³¹ (1997) y en la misma edición el prof. John B Goodenough comentando el trabajo (news and views) dijo: “*Los polarones magnéticos propuestos en manganitas y publicados en este artículo,*

²⁸ M. R. Ibarra, P.A. Algarabel, “Giant volume magnetostriction in FeRh alloy” *Phys. Rev. B*, **50**, 4196-4199 (1994)

²⁹ M. R. Ibarra, P.A. Algarabel, C. Marquina, Y. Otani, S. Yuasa, H. Miyajima, “Giant room temperature volume magnetostriction in a Fe-Rh-Pd alloy” *J. Mag. & Mag. Mat.*, **140**, 231- 232 (1995)

³⁰ M. R. Ibarra, P.A. Algarabel, C. Marquina, J. Blasco, J. García, “Large Magneto-volume Effect in Yttrium Doped La-Ca-Mn-O Perovskite” *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3541-3544 (1995)

³¹ J. M . de Teresa, M. R. Ibarra, P. A. Algarabel, C. Ritter, C. Marquina, J. Blasco, J. García, A. del Moral, Z. Arnold, “Evidence for magnetic polarons in the magnetoresistive perovskites” *Nature*, **386**, 256-259. 1997

constituye una nueva forma de segregación de fases, que abre un nuevo campo en la Física de estado sólido”.

Al principio fue muy difícil introducir estas ideas en el campo de la CMR, hasta que el grupo de Sang-Wook Cheong en Lucent Technologies Laboratory observaron por Microscopía Electrónica la existencia de la segregación a bajas temperaturas de la fase electrónica estática, que ya habíamos propuesto y observado en algunas manganitas³².

3.2. *Nuestro modelo de polarones magnéticos*

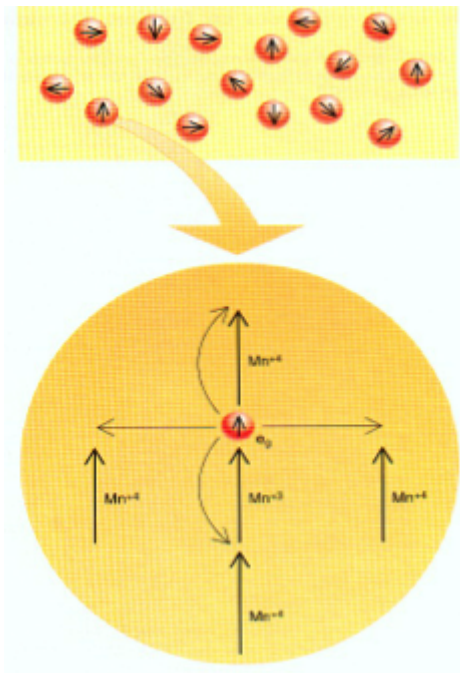
En el modelo propuesto hay dos componentes relevantes que originan el estado electrónico: La interacción del campo eléctrico de cristal y la interacción de doble canje.

- La Estructura cristalina de perovskita y la sustitución de cationes divalentes por cationes trivalentes proporciona la existencia de un portador itinerante y con espín polarizado.
- La Interacción de canje entre los momentos magnéticos originados por los electrones t_{2g} está localizada en los iones de Mn y es ferromagnética. El portador polarizado e_g se puede transferir entre iones vecinos de Mn cuando los momentos magnéticos están alineados en paralelo. Por consiguiente el orden magnético se asocia con una gran movilidad electrónica, es decir con el estado metálico.
- En el estado paramagnético los portadores se localizan como “*clusters*” ferromagnéticos y sólo por “*hopping*” pueden pasar de un ion de Mn a otro. Utilizando dispersión de neutrones de bajo ángulo, pudimos confirmar la existencia de estos “*cluster*” que por su naturaleza magnética se les denominan polarones magnéticos.

4. **La relevancia de lo pequeño: Nano-magnetismo**

La Ciencia y el conocimiento científico se basan en la interacción del hombre con el mundo que nos rodea. La necesidad de entender los fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza ha sido durante siglos la principal motivación de los filósofos naturales y de los científicos. En los primeros tiempos, la observación del cielo y las estrellas motivaron todo tipo de especulaciones, pero no sólo eran objeto de atención las grandes masas celestes, su origen y formación sino también la naturaleza de sus partes constituyentes.

³² M. Uehara, S. Mori, C. H. Chen, S.-W. Cheong “Percolative phase separation underlies colossal magnetoresistance in mixed-valent manganites” Nature **399**, 560-563 (1999)



Evidence for magnetic polarons in the magnetoresistive perovskites

**J. M. De Teresa^{*}, M. R. Ibarra^{*}, P. A. Algarabel^{*},
C. Ritter[†], C. Marquina^{*}, J. Blasco^{*}, J. García^{*},
A. del Moral^{*} & Z. Arnold^{*}**

^{*} Departamento de Física de la Materia Condensada and Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, Universidad de Zaragoza and Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 50009, Zaragoza, Spain
[†] Institut Laue-Langevin, BP 156, 38042 Grenoble Cédex 9, France

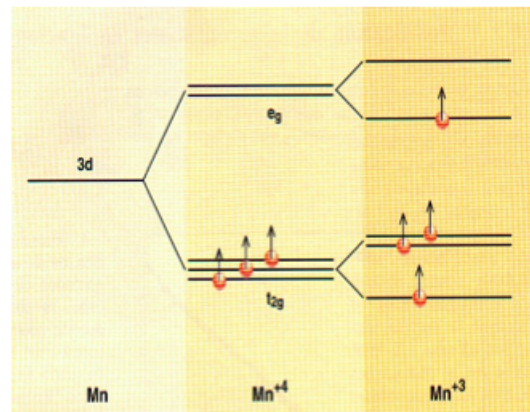
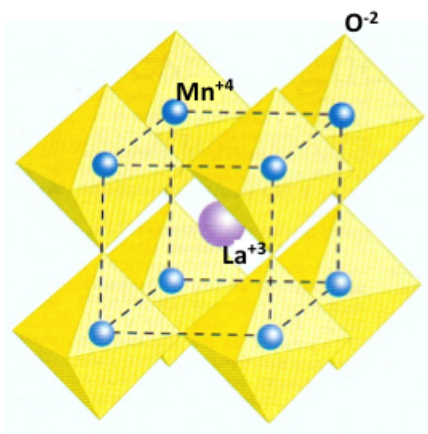
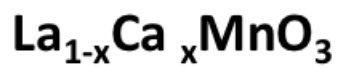


Figura 1

Para los filósofos atomistas Leucipo de Mileto [siglo V a.C.], Demócrito de Abdera (siglos V-IV a.C.), Epicuro de Samos [341-270 a.C.] . . . , ‘*todo lo que existe es lo vacío (-no ser-) y lo lleno (-ser-) formado por átomos indivisibles, infinitamente pequeños, eternos y en movimiento, átomos que no tienen diferencias cualitativas pero si de forma y configuración*’. Así, creían que todos los fenómenos de la naturaleza eran explicables en términos del comportamiento y propiedades de unas entidades últimas, elementales, indivisibles y localizadas los átomos. Para ellos el comportamiento de los cuerpos complejos se podía explicar en función del de sus partes o componentes: “*Nada puede crearse a partir de la nada, la interacción entre las cosas existentes se produce entre átomos por contacto y el vacío hace posible el cambio y el movimiento*”.

Aristóteles [384-322 a.C.] rechazó la idea atomista con el argumento, de que no puede existir el vacío subyacente entre átomos, consideraba que la materia está constituida de forma continua y no puede dividirse en partes irreducibles. Su influencia generó durante toda la Edad Media una oposición al atomismo, basada en consideraciones teológicas, que lo redujo a muy pocos seguidores. El atomismo cobró de nuevo auge en los siglos XV y XVI coincidiendo con la crítica al aristotelismo de Nicolás de Cusa [1401-1464], uno de los primeros filósofos en cuestionar el modelo geocéntrico del universo y por Giordano Bruno [1548-1600] de infausto final quemado en la hoguera por defender, entre otras, sus ideas de heliocentrismo. Finalmente Pierre Gassendi [1592-1655] revitalizó estas ideas al reconciliar el atomismo con el pensamiento cristiano. Para ello sustituyó los átomos infinitos, eternos y semovientes por un número finito de átomos creados e impulsados por Dios.

Gottfried Leibniz [1646-1716] en su obra *Monadología* (1714), que presenta su metafísica de las sustancias simples, introduce el concepto de “mónadas”. En su opinión, los átomos eran entidades físicas extensas y hasta divisibles mientras que las mónadas, que no eran materiales, ni extensas, ni divisibles, son los elementos últimos del universo, “las formas sustanciales del ser”, con las propiedades de ser: eternas, indivisibles, individuales, sujetas a sus propias leyes, sin interacción.

Los descubrimientos independientes de Antoine-Lorent Lavoisier [1743-1794] y Mijaíl Lomonósov [1711-1765] proporcionaron el primer paso científico significativo en la teoría atómica, ya que todas las contribuciones anteriores no se basaban en la experimentación, al postular la ley de conservación de la masa (materia), “La materia no se crea ni se destruye, simplemente se transforma”. Hipótesis demostrada por el químico John Dalton (1804) en sus medidas de las masas de los reactivos y de los productos de reacción. Concluyó además que las sustancias estaban compuestas de átomos idénticos para cada elemento pero que eran diferentes de unos a otros.

Amedeo Avogadro (1811) propuso que el volumen de un gas a temperatura, presión

y volumen dados, es proporcional al número de partículas independientemente de su naturaleza. Nuestro académico correspondiente y premio Nobel 1926, Jean Perrin fue quien a principios del siglo XX determinó por varios métodos el valor de la llamada constante de Avogadro, cuantificando este número.

Los átomos intuidos por Leucipo, se pudieron observar 25 siglos después con microscopios desarrollados recientemente. La última generación de microscopios electrónicos de transmisión de alta y ultra alta resolución ha hecho posible observar los átomos individuales y explorar la materia a nivel atómico determinando su naturaleza química. Es decir, es posible llevar a cabo la espectroscopia en un átomo individual.

Por otro lado, el descubrimiento del microscopio de efecto túnel (1981) ha permitido obtener imágenes de la morfología de una superficie. Para ello utilizan una punta metálica que barre dicha superficie a una distancia fija. Por efecto túnel, los electrones pasan de los átomos más extremos de la punta a los de la superficie de la muestra, o viceversa. Este proceso, que puede ser controlado con resolución de picómetros (10^{-12}m), permite mantener fija la distancia punta-muestra cuando se realizan desplazamientos laterales sobre la muestra, posibilitando explorar y controlar la materia a nivel atómico.

La trascendencia de ambas técnicas fue reconocida con la concesión del premio Nobel de Física 1986 a sus inventores; Ernst Ruska por sus trabajos en óptica electrónica y el diseño del primer microscopio electrónica y a Gerd Binnig y Heinrich Rohrer por su diseño del microscopio de efecto túnel³³. Estos descubrimientos al permiten investigar en la escala de los nanómetros (10^{-9}m), que es la escala de longitud de las biomoléculas, abrieron un escenario emergente para una investigación interdisciplinar en la que las Ciencias de la vida y de los materiales se unen con el objetivo de resolver problemas en la frontera de las disciplinas tradicionales.

Éste es el nuevo campo de la Nanociencia que, basada en estas potentes técnicas de caracterización, trata de comprender qué pasa a estas escalas y aborda nuevos retos en el conocimiento científico, pero no se queda ahí porque junto a la Nanotecnología busca manipularlo y controlarlo. Cada descubrimiento científico representa un progreso de la Sociedad y de forma creciente los logros científicos influyen cada vez más en la evolución social pero la manipulación de la materia a escala atómica puede crear una utopía de abundancia, pensando que cualquier sistema puede hacerse más barato o cualquier enfermedad abordada, por ejemplo utilizando ensambladores moleculares.

³³ Nobel Lectures in Physics, 1981-1990, Edited by Gösta Eksping (University of Stockholm, Sweden) February 1993

4.1. *La Nanociencia: un nuevo enfoque científico*

En el año 2000 comenzó una nueva etapa de nuestro grupo al volcarnos hacia una investigación más interdisciplinar en estrecha colaboración con diferentes grupos, principalmente de médicos y químicos con el objetivo de explorar nuevos fenómenos que tienen lugar al reducir el tamaño de los sistemas y el posible uso de nano-materiales en biomedicina. Se necesitaban nuevas infraestructuras y dio comienzo el proyecto del Instituto Universitario de Nanociencia de Aragón –INA– que, en pocos años, ha propiciado en Zaragoza una gran actividad en el campo de la Nanociencia.

El avance en el conocimiento y la tecnología de sistemas a escala nanométrica en los últimos años ha sido posible por el control del crecimiento del material a nivel atómico y su caracterización con resolución atómica. La preparación de películas delgadas de multicapas magnéticas de gran calidad permitió descubrir el efecto GMR, que ahora es la parte esencial del sensor en las cabezas lectoras del disco duro en nuestros ordenadores.

Éste descubrimiento abrió un nuevo campo de investigación conocido como espintrónica, en el que el control del espín de los electrones y no sólo la carga, está teniendo un impacto en la ciencia y la tecnología. La relevancia del efecto GMR en investigación fue reconocida con el Premio Nobel de Física de 2007 concedido a los profesores. Albert Fert y Peter Grünberg³⁴ que lo descubrieron, independientemente. Según Fert³⁵:

“La Nanociencia constituye uno de los campos más prometedores de la investigación de hoy y sus demandas de desarrollo, requiere no sólo de instalaciones para la fabricación de nano-estructuras sino también de herramientas avanzadas para su caracterización.

Ningún progreso en superredes, puntos cuánticos, nano-imanes, etc. hubiera sido posible sin una caracterización precisa para guiar la fabricación y permitir la interpretación y modelización de los resultados experimentales. La Nanociencia se basa en el control de la materia en la escala de los átomos, las moléculas o las proteínas –la escala de las células es mucho más grande. Ésto trae de nuevo el reto el de la interdisciplinariedad ya que la investigación se sitúa en la frontera de las disciplinas clásicas como la Física, la Química, la Medicina, la Bioquímica, la Biología y la Ingeniería”.

4.2. *El Magnetismo de lo pequeño*

El ferromagnetismo es un fenómeno que da lugar a las principales aplicaciones de los materiales magnéticos, bien por su alta capacidad de atraer como imanes permanentes o

³⁴ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/

³⁵ Carta de apoyo para la creación del Laboratorio de Microscopias Avanzadas (LMA) (2007)

de confinar el flujo de campo magnético, permitiendo que actúen como elementos para apantallar o dirigirlo. Este fenómeno producido por la interacción de canje, que es de largo alcance, da lugar a un fenómeno de ordenamiento colectivo y su longitud característica es del orden de nanómetros. Por otra parte, estos materiales en estado virgen, previo a la aplicación de campo magnético, no presentan imanación espontánea, debido a la existencia de dominios magnéticos, cuyo tamaño depende del material pero que está en el rango de las micras en muchos casos.

¿Qué ocurre cuando se reducen las dimensiones del material?, suponiendo una escala mesoscópica entre algunos nanómetros y decenas de micras. En esta situación el material, por su tamaño, sólo puede albergar un dominio magnético y se tendrían partículas monodominio. En principio estas partículas deberían ser ferromagnéticas pero si su tamaño es excesivamente pequeño interviene otra magnitud característica, la energía de la anisotropía magneto-cristalina, que tiende a alinear los momentos magnéticos en determinadas direcciones del material. Si debido a su pequeño volumen, disminuye y llega a ser inferior a la energía térmica, la imanación fluctúa, desaparece el ferromagnetismo y da paso a un nuevo fenómeno: el super-paramagnetismo³⁶.

4.3. Las nuevas fábricas

Los avances en las técnicas de alto vacío, combinados con la incidencia de haces de partículas o de radiación electromagnética de alta energía, hacen posible “arrancar” átomos de la superficie de un material y depositarlos sobre un substrato en el que crece de nuevo pero de manera controlada, pudiendo llegar a formar recubrimientos con un número limitado de capa atómicas. Estos recubrimientos pueden alternarse, utilizando distintos materiales, que formarían láminas delgadas con nuevas propiedades, que no están presentes ni los materiales originales ni sus aleaciones. Un ejemplo muy concreto son las multicapas magnéticas en las que se observó la magnetoresistencia gigante³⁷.

Las láminas delgadas, según los fenómenos que se quieran observar o la aplicación a que se destinen, han de procesarse mediante técnicas de litografía óptica o electrónica, dependiendo del tamaño del micro o nano-sistema que queramos fabricar. Para estos procesos se necesitan ambientes muy controlados y se realizan en salas blancas tanto para los procesos de micro- como nano-fabricación. Éstos son los procesos conocidos como “*top-down*”³⁸.

³⁶ R. C. O’Handley “Modern Magnetic Materials” Ed. New York Wiley (2000)

³⁷ M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert et al., “Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices”, *Phys. Rev. Lett.*, **61** 2472 (1988)

³⁸ B. Bhushan “Encyclopaedia of Nanotechnology” 2nd edition Ed. Springer (2016)

En nuestro laboratorio se ha desarrollado una nueva técnica de nano-fabricación que consiste en el crecimiento de materiales nano-estructurados utilizando haces de iones y electrones en la cámara de un microscopio electrónico. En este caso se inyecta un gas (precursor órgano-metálico) cuyas moléculas se destruyen por la acción de un haz focalizado de partículas que libera su parte orgánica y deja depositados los átomos metálicos. Siguiendo estas técnicas, se han crecido materiales magnéticos, superconductores y metálicos con un control inusitado, dando lugar a propiedades que no se habían podido observar hasta el presente, siendo nuestro laboratorio uno de los más reconocidos a nivel internacional en este campo.

4.4. *Las nanopartículas magnéticas y las Ciencias de la vida*

Uno de los campos más apasionantes de la investigación es el estudio de la interacción de materiales nano-estructurados con biomoléculas y células. Los avances en este campo permitirán mejorar los métodos de diagnóstico y por consiguiente la detección precoz de enfermedades y la evolución hacia nuevas terapias más eficientes.

Una cuestión importante en la terapia es la cantidad de fármaco que es necesario suministrar y muchos tratamientos del cáncer están limitados por la toxicidad de los fármacos actuales. La focalización de estos fármacos hacia las células malignas es uno de los campos más atractivos de investigación, porque permite disminuir las dosis. La ablación local de estas células es otra línea activa de investigación³⁹. La detección temprana de la presencia de marcadores de la enfermedad se puede lograr con técnicas mejoradas de bio-sensores y de imagen basados en la Nanotecnología.

La eficiencia en la detección y la localización de los antígenos depende de nuestra capacidad de fabricar nano-objetos artificiales y conjugarlos con unidades funcionales sintéticas o naturales derivadas de organismos vivos.

Probablemente las nanopartículas magnéticas son los nano-materiales más adecuados para aplicaciones biomédicas⁴⁰. Pueden ser utilizados como detectores de la enfermedad, como vehículos inteligentes y como los agentes que actúan. Para el uso in vivo, las nanopartículas magnéticas deben ser biocompatible y para su unión con sustancias activas: biomoléculas o fármacos, necesitan de superficies específicas. Todos estos requisitos pueden ser alcanzados por nanopartículas tipo “*core-shell*”.

³⁹ G. F. Goya, V. Grazu, M. R. Ibarra, “Magnetic Nanoparticles for cancer therapy” *Current Nanoscience* **4**, 1-16 (2008)

⁴⁰ M. Arruebo, R. Fernández-Pacheco, M. R. Ibarra, J. Santamaría, “Magnetic nanoparticles for drug delivery”, *Nano Today*, **2**, 22-32 (2007)

El potencial de diagnóstico en laboratorio (“in vitro”) de las nanopartículas es enorme, ya que pueden ser utilizadas en plataformas de bio-sensores una vez que se conjugan con ligandos específicos que proporcionen una acción de bio-reconocimiento determinado⁴¹. Estos bio-sensores permiten cuantificar la presencia: de marcadores tumorales u otros antígenos, elementos contaminantes u tóxicos en alimentos, virus, etc.

Las nanopartículas magnéticas, en particular, tienen un gran potencial en su aplicación como agentes de contraste en tomografía por resonancia magnética nuclear. En la actualidad algunos agentes de contraste están basados en la utilización de estos nano-materiales, pues su comportamiento magnético hace que se modifiquen las condiciones de resonancia local de los momentos magnéticos de los protones de Hidrógeno que constituyen los tejidos de nuestro organismo. La Nanotecnología tiene aquí un papel relevante dado que si las nanopartículas que constituyen el agente de contraste se funcionalizan para detectar un determinado tipo de cáncer, sería posible tratar precozmente un tumor incipiente antes de su desarrollo. Ésta es una línea de investigación muy activa en el campo de la detección del cáncer.

La aplicación por vía intravenosa de nanopartículas magnéticas en forma coloidal produce una respuesta inmunológica del sistema retículo endotelial. La presencia de las nanopartículas en el torrente sanguíneo, induce el proceso de opsonización mediante el cual las nanopartículas son recubiertas por proteínas (opsoninas) que las marcan para su inmediata eliminación del torrente sanguíneo por parte de los macrófagos; por ello, se hace necesario su recubrimiento por materiales poliméricos biocompatibles que puedan evadir esta acción.

Hemos propuesto un método para la administración local de fármacos en un órgano determinado, basado en la atracción magnética de un pequeño imán implantado en un órgano determinado sobre las nanopartículas que portan el fármaco. Experimentos “in-vivo” desarrollados en animales mostraron que las nanopartículas que circulan pueden ser atraídas por el imán y cuando se inmovilizan éstas pueden liberar el fármaco adsorbido. Este método se considera como una alternativa más eficiente que la actual, basada en la administración generalizada del fármaco⁴².

Un campo fascinante es la interacción de las nanopartículas con las células. Estos

⁴¹ D. Serrate, J. M.de Teresa, C. Marquina, J. Marzo, D. Saurel, F. A. Cardoso, S. Cardoso, P. P. Freitas, M. R. Ibarra, “Quantitative biomolecular sensing station based on magnetoresistive patterned arrays” *Biosensors and bioelectronics*, **35**, 206-212 (2012)

⁴² R. Fernández-Pacheco, J. G. Valdivia, M. R. Ibarra, “Magnetic Nanoparticles for Local Drug Delivery Using Magnetic Implants” in J. Weifu Lee y R. S. Foote (eds.), *Micro and Nano Technologies in Bioanalysis, Methods in Molecular Biology*, vol. 544, chap. 35, Humana Press, a part of Springer Science + Business Media, LLC, (2009)

experimentos son interesantes para la investigación básica y también para posibles aplicaciones. Las células dendríticas cargadas con nanopartículas pueden hacer de vehículo y transportar las nanopartículas hacia la región de formación del tumor, como un “caballo de Troya”. Una vez allí, se pueden calentar mediante la aplicación de un campo de radiofrecuencia externo, y producen la destrucción de las células tumorales. Experimentos “in-vitro” realizados en nuestro laboratorio han demostrado la viabilidad del método a nivel celular⁴³.

5. El Instituto de Nanociencia y las nuevas infraestructuras científicas

Gran parte de los avances científicos en el ámbito de la Física, a partir de los años 30, han estado estrechamente relacionados con la Ciencia de Materiales. Los transistores no se habrían descubierto sin el desarrollo de tecnologías que permitieron la obtención de germanio puro o el efecto de magnetorresistencia gigante se hubiera detectado sin la posibilidad de diseñar láminas multicapa ultra delgadas. Los avances tecnológicos han tenido un gran impacto en el descubrimiento de nuevos fenómenos físicos y viceversa. Esta dialéctica científica esencial, dicta la evolución de las Ciencias Naturales, pero en el caso de la Física, probablemente es donde se reflejan de una forma más patente. El Magnetismo no es ajeno y nos muestra claros ejemplos como el caso mencionado de las multicapas magnéticas que permitieron observar un nuevo fenómeno que hoy día se utiliza cotidianamente en nuestros ordenadores. Otras veces es la idea, la predicción, el cálculo quien se anticipa a la observación, Louis Néel²⁰, en 1932 considerando campos moleculares negativos en el marco de la teoría de Weiss¹⁰ predijo la disposición antiparalela de los momentos magnéticos (antiferromagnetismo y ferrimagnetismo) y posteriormente el desarrollo de los difractómetros de neutrones permitió la confirmación de sus ideas, recibiendo el premio Nobel de Física 1970⁴⁴.

La capacidad de predicción y el atrevimiento de la aproximación, despreciando unos efectos frente a otros, hace de la Física una de las disciplinas más atractivas, fijémonos en la aproximación de campo medio, una simplificación tan grosera a lo que es el problema de muchos cuerpos en la Física, ha permitido explicar fenómenos sin recurrir a una resolución exacta del hamiltoniano.

Otro aspecto importante y que espero compartan en esta Academia es que la Física, arte de plantearse preguntas que pueden llegar a tener respuesta, dispone de un amplio

⁴³ L. Asín, G. F. Goya, A. Tres, M. R. Ibarra “Induced cell toxicity originates dendritic cell death following magnetic hyperthermia treatment” *Cell Death & Disease*, 4, e596. (2013)

⁴⁴ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1970/neel-facts.html

abánico de medios materiales y tecnologías que permiten obtener información mediante la observación en tiempos razonables para reproducir y confirmar muchos fenómenos y predicciones. Las cosas son más difíciles, por ejemplos en campos como la Geología, por la dificultad intrínseca o imposibilidad de reproducir a escala de laboratorio los fenómenos que dieron origen a muchos de sus hallazgos y paradigmas. Otras dificultades están presentes en la Biología en la que llegar a explicar los mecanismos íntimos que hacen funcionar nuestro organismo a nivel molecular es un reto científico que desde un punto de vista físico se ve inalcanzable por los muchos factores a tener en cuenta.

La Física del siglo XXI es y será sin duda una Ciencia con planteamientos más atrevidos ya que está incorporando en sus avances problemas que, antes quedan fuera de sus objetivos, provenientes de otras Ciencias de la vida, en particular de la Biología para acceder a los múltiples retos en el campo de la Medicina. Para todo ello se necesita un buen bagaje científico interdisciplinar y medios tanto para fabricar nuevos materiales como para su observación.

5.1. La relevancia de la investigación en Ciencia de Materiales en Zaragoza

En los años 70, los Departamentos de Óptica y de Bajas temperaturas comenzaron actividades en Física de la Materia Condensada que fueron la base del desarrollo de la Ciencia de Materiales en la Facultad de Ciencias creado en 1985, viniendo de la mano de investigadores de gran nivel que contribuyeron a poner nuestra Facultad como referente nacional. Nuestro grupo se involucró en este contexto y unos años después se consolidó en un nuevo proyecto: El Instituto de Ciencia de Materiales (ICMA) en el que nuestro grupo se integró desde su fundación y en el que desarrollamos nuestra actividad científica. En la actualidad el ICMA es un Centro de Materiales referente a nivel Nacional e Internacional.

5.2. Nace el Instituto de Nanociencia de Aragón

La Nanociencia requiere multidisciplinariedad e infraestructuras, esta dualidad fue el germen de un nuevo proyecto que se inició en el año 2000 y cuajó tres años después con la creación del Instituto de Nanociencia de Aragón-INA.

El INA se basó en una sólida experiencia en Ciencia de Materiales y contrastada trayectoria, incorporando grupos de los ámbitos de la Física, Química, Biología y Medicina. Se definió un proyecto con gran ilusión creando equipos interdisciplinarios de la Facultad de Ciencias y del Hospital Clínico Universitario. Fue una época en que la Nanociencia era una disciplina emergente y había una oportunidad de ser un centro pionero en España, de hecho los primeros centros que se crean en 2003 fueron el Instituto Catalán de

Nanotecnología y el nuestro.

Aparte de la oportunidad hubo un gran apoyo institucional, se confió en este nuevo proyecto desde la Universidad y desde el Gobierno de Aragón, propiciando la creación de infraestructuras y la incorporación de científicos de gran nivel que permitieron un avance rápido. Podemos decir que en sus 13 años de trayectoria se ha consolidado un Centro de excelencia científica y con unas instalaciones científicas de primer nivel que le hacen un polo de atracción científico tecnológico.

5.3. *Una nueva oportunidad el Laboratorio de Microscopias Avanzadas*

El Laboratorio de Microscopias Avanzadas –LMA– surge en el periodo de configuración del INA y tiene su origen en el diseño de un nuevo proyecto relacionado con el programa de Instalaciones Científico Técnicas Singulares (ICTS). Es en este contexto es en el que se propone desde el Gobierno de Aragón la creación de una ICTS basada en la incorporación de las técnicas más avanzadas de caracterización y nano-fabricación. Esta apuesta aprobada en 2007 se apoyó en el reconocimiento que iba adquiriendo el INA y en la implicación institucional de considerar la Nanociencia como una rama estratégica para el desarrollo científico tecnológico de Aragón.

En el año 2009 llegaron dos microscopios TITAN, que fueron de los primeros microscopios electrónicos con corrección de aberración esférica que se instalan en el mundo y los primeros en España. Este hecho marca una inflexión en el desarrollo de la Nanociencia y en la capacidad de avanzar en la Ciencia de Materiales al disponer de los mejores instrumentos para caracterizar la materia a nivel atómico.

El LMA se configuró además, como un laboratorio de coexistencia y complementariedad de las más avanzadas microscopias, por lo que crearon otros dos áreas de microscopía: microscopía de haces combinados de iones y electrones (Dual Beam, DB) en sala blanca y de sonda local o (Scanning Probe Microscopy, SPM). La posibilidades que ofrecen todos estos microscopios (en la actualidad 15, son inmensas) pues permiten observar la materia a nivel atómico y determinar su composición química, realizar procesos de nano-litografía y crecimiento de nano-estructuras con diferentes funcionalidades (magnéticas, superconductoras, conductoras, aislantes...), realizar manipulación atómica y caracterización de superficies con resolución de picómetros.

6. La innovación: una nueva visión

Finalmente sólo una pincelada sobre la relevancia de la innovación y la contribución de nuestro grupo. La investigación científica ha de tener impacto en la Sociedad tanto

para crear más conocimiento como para mejorar los procesos productivos y el confort social. Estamos hablando de la creación de nuevas tecnologías y de un modelo productivo emanado del conocimiento científico. Para ello la relación entre la Academia y la Empresa es esencial. Durante estos últimos años se ha avanzado bastante en este camino y, cada vez más, las empresas ven en nuestros centros de investigación ideas y técnicas que le pueden marcar su desarrollo futuro.

Éste es un aspecto importante que me gustaría resaltar y que debe marcar una línea importante en la investigación, se trata de la innovación basada en el conocimiento científico. Es una satisfacción constatar como en el entorno de los laboratorios de nuestro grupo, y en colaboración con otros, han salido innovadores que emprendieron la aventura de hacer productivos algunos de los logros científicos como lo ha sido las empresas spin-off de nuestra Universidad: Nanoscale Biomagnetics, Nanoimmunotech y más recientemente Graphene Nanotech. Con diferentes grados de madurez y experiencia, estas empresas han desarrollado una labor ingente, llevando un producto, resultado de la investigación científica, al mercado. Es una satisfacción decir que se ha comercializado la ciencia que hemos desarrollado en nanotecnología a nivel mundial, contribuyendo al desarrollo regional, incorporando nuevas tecnologías y tecnólogos formados en nuestro entorno científico. Todo ello redundará en un enriquecimiento social y nos lleva hacia un nuevo modelo productivo, el único que nos llevará a ocupar un lugar predominante a nivel mundial.

Concluyo esta intervención agradeciendo de nuevo a mis compañeros académicos por haber considerado que la labor desarrollada merece mi nominación a esta ilustre Academia.

A mi director de tesis prof. Agustín del Moral quien me introdujo en el campo de la Física de estado sólido y el Magnetismo.

A mi colega el prof. Pedro A. Algarabel en el Departamento de Física de la Materia Condensada.

A mis antiguos alumnos, ahora excelentes científicos: Drs. Clara Marquina, José M. De Teresa, Luis Morellón y otros más jóvenes, a todos los compañeros del grupo de Magnetismo de nanoestructuras, pues su apoyo ha sido esencial.

A todos los colaboradores físicos y de otros ámbitos: médico, bioquímico y químico sin los cuales no hubiese podido aprender tantas cosas que ignoraba.

A mis padres por haberme dado una educación cálida y muy humana.

A mis hijas Mari Loli y Rocío por todo el tiempo que no le he dedicado por mis avatares profesionales, a los nuevos allegados Holli y mi nieto Adrián y mi esposa Loli que siempre ha estado, está y estará a mi lado, pues no concibo mi vida de otra manera.

Me gustaría terminar este discurso parafraseando a Clerk Maxwell, pues considero que su reflexión encierra algo que he podido sentir tanto en mi desarrollo profesional como en mi vida cotidiana y que quizá ustedes puedan compartir:

“Cuando quieras emprender algo, habrá mucha gente que te dirá que no lo hagas, cuando vean que no te pueden detener, te dirán como lo tienes que hacer y cuando finalmente vean que lo has logrado, dirán que siempre creyeron en ti”

MUCHAS GRACIAS