

DISCURSO PRONUNCIADO
POR EL NUEVO DOCTOR
JOHANN-MARTIN SPAETH

Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector
Excelentísimas e Ilustrísimas autoridades
Claustro Universitario
Señoras y señores

ESTA visita a Zaragoza constituye un punto culminante entre mis numerosas visitas regulares al Departamento de Física de la Universidad durante casi un cuarto de siglo. Estoy muy agradecido a esta prestigiosa e histórica Universidad por el gran honor de que se me otorgue la distinción académica de Doctor Honoris Causa, y quisiera, al mismo tiempo, felicitar cordialmente al otro doctorando, Dr. Robert Kugler. Aparte del honor mismo, para mí constituye también una magnífica «formalización» de la cálida amistad de tantos colegas del actual Departamento de Física de la Materia Condensada, que he tenido el privilegio de disfrutar durante tantos años, particularmente por parte de mis padrinos, los profesores Rafael Alcalá y Pablo Alonso, con quienes he mantenido una estrecha colaboración durante más de dos décadas. Muchos estudiantes de doctorado y jóvenes doctores de nuestras dos Universidades han participado en esta colaboración y han trabajado en ambos laboratorios.

El éxito de estos intercambios científicos nos impulsó al Prof. Rafael Alcalá y a mí mismo a proponer a nuestras Universidades, a finales de los años ochenta del pasado siglo, uno de los primeros intercambios de estudiantes en el marco del programa ERASMUS, que se había puesto en marcha poco antes. La idea fue intercambiar estudiantes de Física y Química entre las Universidades de Paderborn y Zaragoza. Entonces no era común para un estudiante alemán de Física o Química pasar un año en una Universidad española, y viceversa. En general, sólo los estudiantes de idiomas buscaban tales intercambios, mientras que los estudiantes de ciencias naturales preferían un país de lengua inglesa, normalmente Inglaterra o los Estados Unidos. Pero muchos estudiantes aprendieron rápidamente que sólo Física o sólo Química no lo es todo, y que es atractivo llegar a conocer otra cultura y aprender otro idioma, aparte del inglés, sin considerar si un día será útil o no para la profesión. El éxito del programa —hemos intercambiado más de setenta estudiantes— es impulsado por el entusiasmo del Prof. Alcalá y mío a través de nuestro papel como coordinadores del programa. El programa hoy llamado SÓCRATES-ERASMUS continúa adelante y el intercambio ha adquirido recientemente una nueva dimensión. El Departamento de Física de Paderborn ha empezado a financiar becas para que algunos licenciados de Zaragoza puedan redactar una tesina en Paderborn con el fin de conseguir el grado Master of Science en Física.

Al igual que Zaragoza, Paderborn es una ciudad antigua e histórica. Tiene una magnífica catedral, construida ya en el siglo XI y es sede de un arzobispado. La antigua Universidad fue inaugurada oficialmente en el año 1616, pero fue cerrada por los prusianos en 1819 para apoyar a la Universidad de Bonn, recién creada en su provincia del oeste. Sin embargo, los prusianos no pudieron cerrar la Facultad de Teología de la Universidad antigua a causa del Concordato. En 1972 el Gobierno del estado de Renania Septentrional-Westfalia abrió una nueva Universidad en Paderborn. Por eso, podemos presumir de tener ahora en Paderborn dos instituciones universitarias.

El interés común de investigación entre nuestros grupos se enmarca en el área de la Física del Estado Sólido que mi padrino el Prof. Alcalá introdujo en la Universidad de Zaragoza, después de volver de los Estados Unidos, en 1975, y que yo traje a la recién creada Universidad de Paderborn, en 1974, desde la Universidad de Stuttgart, donde realicé mi doctorado y la habilita-

ción y donde enseñé unos años como profesor de Física Experimental, antes de trasladarme a Paderborn para ocupar allí la primera Cátedra de Física Experimental. El Prof. Alcalá y yo estábamos interesados en la investigación de defectos puntuales en materiales cristalinos no-metálicos. Particularmente, nos interesaba la investigación de defectos puntuales utilizando métodos espectroscópicos, sobre todo la Resonancia Paramagnética Electrónica o EPR y técnicas relacionadas. Quisiera intentar explicar en términos sencillos por qué esta área de la Física es fascinante y muy importante.

Quizás ustedes han pensado alguna vez que el género humano puede estar lleno de defectos, pero que la naturaleza es perfecta. Al hablar de cristales, la verdad es lo contrario: si los cristales fuesen perfectos, muchos de ellos serían inútiles y no tendríamos ordenadores ni microelectrónica. Los defectos en los cristales son un regalo de la naturaleza.

La matriz regular de átomos en tres dimensiones que constituye la red de un mono-cristal puede tener numerosos defectos puntuales. Una red monoatómica como la del silicio puede tener huecos donde faltan átomos, o átomos que están en sitios intersticiales donde normalmente no suelen estar o hay impurezas incorporadas, es decir, átomos de otros elementos como, por ejemplo, fósforo, boro o hierro. En redes compuestas como las de arseniuro del galio, un átomo de galio puede ocupar el sitio del arsénico o un átomo de arsénico puede ocupar el sitio de galio. Éstos son defectos intrínsecos y se llaman defectos anti-sitios.

Desgraciadamente, muchas impurezas se incorporan a los mono-cristales durante su crecimiento y, a menudo, es prácticamente imposible evitarlo. En algunos semiconductores como el silicio, los defectos puntuales aislados o pequeños conjuntos de ellos, aunque estén en concentraciones minúsculas, desempeñan un papel muy importante, ya que determinan la conductividad eléctrica y también propiedades ópticas del material. Muchas veces es suficiente con quitar un átomo de entre millones de ellos o reemplazar sólo uno en un millón por un átomo de impureza, para cambiar las propiedades eléctricas en varios órdenes de magnitud. El control tecnológico de estos defectos es la base de la opto, y micro-electrónica moderna, que tanto influyen en nuestras vidas hoy en día. Un dispositivo fabricado con silicio ultrapuro no funcionaría: hay que doparlo apropiadamente con impurezas para obtener las propiedades deseadas. Generalmente, para ser capaz de controlar la influen-

cia de los defectos en sólidos, es necesario disponer de un método que permita determinar sus estructuras microscópicas al nivel atómico, y es necesario conocer cómo se pueden generar esos defectos de una manera controlada. Esto se llama «ingeniería de defectos».

Por supuesto, el importante papel que desempeñan los defectos en las propiedades de los cristales no se limita a los semiconductores y a la electrónica. Hay muchas áreas en la ciencia de materiales donde los defectos son importantes y a menudo cruciales. Un ejemplo evidente son las piedras preciosas, donde una concentración minúscula de impurezas metálicas determina el color. Quisiera mencionar una serie de piedras preciosas que se llaman de diferente manera pero que son todas el mismo cristal básico: el cuarzo. Ustedes saben que el cuarzo puro no tiene color, pero hay varios tipos de cuarzo que aparecen con colores distintos: el cuarzo ahumado es pardusco, la amatista es azul-violeta, la citrina es amarilla y el cuarzo róseo es rosa. Esas diferencias de color se deben a la presencia de pequeñas cantidades de impurezas, y resulta sorprendente que, aún hoy en día, no se conoce con precisión qué impureza o qué mezcla de impurezas son responsables del color de muchas de esas piedras preciosas, como, por ejemplo, del color violáceo de la amatista.

El método espectroscópico más importante para la investigación y la determinación de las estructuras microscópicas de los defectos puntuales es la EPR. Este método, que ha celebrado recientemente su quincuagésimo aniversario, fue desarrollado después de la segunda guerra mundial, cuando el radar y la tecnología de microondas estuvieron disponibles. La determinación de la estructura de un defecto con EPR utiliza el hecho de que los electrones y muchos núcleos atómicos tienen pequeños momentos magnéticos, es decir, que son pequeños imanes. Probablemente ustedes han jugado alguna vez con imanes y saben que entre ellos hay fuerzas de interacción que dependen de la posición relativa de los polos norte y sur y de su separación. Ustedes saben también que la aguja de una brújula es un imán que se orienta por el campo magnético terrestre señalando hacia el norte. Si se la quiere girar en otra dirección, por ejemplo, hacia el sur, se necesita una fuerza para conseguirlo. Los átomos tienen un núcleo y una capa de muchos electrones. Las leyes de la física cuántica dicen que si hay un número impar de electrones en la capa resulta un imán electrónico y tenemos un átomo paramagnético.

Si se coloca un cristal con una impureza paramagnética en un campo magnético, su imán electrónico va a orientarse a lo largo del campo magnético aplicado. Los otros átomos de la red cristalina tienen números pares de electrones debido al enlace químico, y, en consecuencia, los únicos imanes en las cercanías del defecto son los de los núcleos atómicos que también se orientan a lo largo del campo magnético. Se puede cambiar la orientación del imán electrónico aplicando el campo magnético alterno de una radiación electromagnética, que es normalmente una radiación de microondas de frecuencia entre 10 y 100 GHz, y una longitud de onda entre 3 cm y 3 mm. Cuando se cumple la condición de resonancia, la radiación de microondas es absorbida por el cristal y es esta absorción la que se mide. La energía cuántica de las microondas, determinada por su frecuencia, tiene que ser suficiente para que el imán electrónico o el imán nuclear giren en un cierto campo magnético. Si lo que gira es un imán electrónico, se habla de EPR; si es un imán nuclear; se habla de Resonancia Magnética Nuclear o NMR. Estos giros de los imanes son medidos como líneas de resonancia. La información sobre la estructura del defecto se obtiene de la interacción entre el imán electrónico y los imanes nucleares, de los alrededores de la red. Muchas veces esto se refleja en desdoblamientos característicos de las líneas de resonancia. El tamaño de los desdoblamientos es proporcional a los tamaños de los imanes nucleares que son, por otra parte, característicos de cada núcleo atómico. La investigación de estos desdoblamientos en función de la orientación del cristal en el campo magnético y su análisis según las leyes de la física cuántica permiten muchas veces la determinación de la estructura microscópica de un defecto y de su estructura electrónica cuántica. La espectroscopia EPR no sólo es importante en la física del estado sólido sino también o incluso más en la química y biología para el análisis de moléculas.

El Departamento de Física de Zaragoza compró su primer espectrómetro EPR en el año 1980. En Paderborn construimos nuestros espectrómetros por razones que voy a explicar ahora.

En los sólidos, muchas veces las cosas son más complicadas de lo que parece según lo que he dicho hasta ahora. A causa de la multitud de interacciones magnéticas entre el imán electrónico y los de los núcleos de las cercanías en la red (para dadores en semiconductores pueden ser unos cientos), la línea de resonancia se ensancha, y la información necesaria para determinar la estructura del defecto parece perdida. La anchura de la línea de resonancia es pro-

porcional al momento magnético. Ya que los momentos magnéticos nucleares son 2000 veces más pequeños que el momento magnético electrónico, la medición de NMR, en vez de EPR, resultaría en una resolución superior y daría la misma información estructural, porque la interacción magnética es igual si es medida desde un núcleo o desde el electrón paramagnético. Desgraciadamente, la sensibilidad de la NMR es unos 9 órdenes de magnitud menor que la de la EPR, y, dada la minúscula concentración de defectos no es posible obtener la información deseada directamente con NMR.

Pero hay un truco para resolver este problema: simultáneamente con las microondas el cristal es irradiado con una segunda radiación electromagnética de radiofrecuencia. Su energía es escogida de tal manera que induce un giro de los momentos magnéticos de los núcleos que interaccionan con el imán electrónico. El electrón paramagnético nota el giro nuclear y esto cambia su señal de EPR, en el rango entre un uno por ciento y algunas partes por mil, cambios que pueden ser medidos con gran sensibilidad. El método es una doble resonancia y en inglés se le conoce como «Electron Nuclear Double Resonance», abreviado ENDOR. Dos condiciones de resonancia tienen que cumplirse simultáneamente. Un espectro ENDOR contiene líneas NMR debidas a los núcleos del entorno del electrón paramagnético en el cristal y el análisis de dichas líneas en función de la orientación del cristal en el campo magnético exterior permite a menudo la determinación de la estructura de un defecto.

En 1981 Justiniano Casas González vino como post-doc a nuestro laboratorio para trabajar un año con aquel método de ENDOR y así empezó nuestra colaboración con Zaragoza. Como en esos años no había espectrómetros ENDOR disponibles, iniciamos la construcción de un espectrómetro ENDOR en Zaragoza con la ayuda de dos subvenciones concedidas por la Fundación Volkswagen en Alemania. Hay que mencionar que un espectrómetro ENDOR es una máquina sofisticada que requiere no sólo la tecnología de microondas y radiofrecuencia sino también instalaciones para trabajar a baja temperatura, porque todas las medidas tienen que efectuarse a temperaturas de unos pocos grados por encima del cero absoluto: de otra forma, las vibraciones de la red inducidas por la temperatura inhibirían la medida de las minúsculas interacciones magnéticas. En Zaragoza el primer espectrómetro ENDOR funcionaba en 1985. Durante nuestra colaboración, subvencionada tres años mediante «Acciones Integradas» entre España y Alemania, hemos

estudiado, sobre todo, cristales de fluoruros con impurezas metálicas. Este trabajo se ha plasmado en diez publicaciones comunes en revistas internacionales de Física y en algunas tesis doctorales en Zaragoza.

Lo que hemos aprendido juntos sobre los defectos en los fluoruros es la base de la física de la radiografía digital de rayos X, ahora disponible en muchos hospitales y que probablemente va a reemplazar las películas convencionales en un futuro próximo. Los rayos X producen defectos puntuales (daño por radiación) estables a la temperatura ambiente, lo que permite almacenar la información de la imagen. Para leer esa información, los defectos pueden ser estimulados ópticamente por un láser a fin de que se recombinen y transfieran la energía de recombinación a un activador, normalmente un ion de tierras raras que da una luminiscencia que es registrada para generar una imagen digital. A causa de la superior sensibilidad de este método comparado con la película convencional de rayos X, la dosis de éstos puede ser reducida en un orden de magnitud. Imágenes digitales de rayos X pueden almacenarse electrónicamente y mandarse por teléfono o radio. En Paderborn estamos estudiando algunos sistemas para este tipo de aplicación, en particular unas cerámicas vidriadas basadas en fluoruros que contienen partículas cristalinas muy pequeñas y que tienen una sensibilidad comparable al sistema comercial actual, pero con una mayor resolución espacial. Estos sistemas pueden fabricarse de distintas formas y tendrán muchas aplicaciones en la obtención de imágenes en medicina y en ensayos no destructivos de materiales.

Finalmente, quisiera repetir que es para mí un gran honor recibir la distinción académica Doctor Honoris Causa por la Universidad de Zaragoza. Estoy muy agradecido a los colaboradores en Paderborn y en Zaragoza que tanto han contribuido a mis investigaciones durante muchos años. En parte el gran honor es también un reconocimiento a sus contribuciones. Doy las gracias al Excelentísimo Rector Magnífico y al Consejo de Gobierno de esta Universidad por este nombramiento, así como a todos los colegas que han apoyado mi nominación. Agradezco también a mis dos padrinos, los profesores Rafael Alcalá y Pablo Alonso, su amistad y su apoyo durante tantos años y los amables comentarios que me han dedicado en el elogio.

Muchas gracias.

Johann-Martin Spaeth