

HONORIS CAUSA

Prof. Pedro Miguel Echenique
Dpto. Física de Materiales
Facultad de Química
UPV/EHU. (San Sebastián)
Pº Manuel de Lardizabal, 3
20018 San Sebastián

Y

Donostia International Physics Center
Pº Manuel de Lardizabal, 4
20018 San Sebastián

Honoris Causa por la Universidad de Valladolid
1 Diciembre 2000. 12,00h
Paraninfo de la Universidad

Magnífico y Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad de Valladolid, Excmo. Sr. Consejero de Educación, Magníficos y Excelentísimos Señores Rectores de otras Universidades, Ilustrísimas autoridades, miembros del Claustro Universitario, Señoras y Señores.

Un bello texto de Carmen Iglesias me recordaba las palabras que Cervantes pone en boca de Don Quijote: *"Entre los pecados mayores que los hombres cometen - dice nuestro hidalgo -, aunque algunos dicen que es la soberbia, yo digo que es el desagradecimiento ateniéndome a lo que suele decirse: que de los desagradecidos está lleno el infierno. De este pecado, en cuanto me ha sido posible, he procurado yo huir desde el instante que tuve uso de razón; y si no puedo pagar las buenas obras que me hacen con otras obras, pongo en su lugar los deseos de hacerlas y cuando éstos no bastan, las publico; porque quien dice y publica las buenas obras que recibe, también las recompensara con otras, si pudiera; porque, por la mayor parte, los que reciben son inferiores a los que dan."*

Siendo éste mi caso quisiera proclamar a los cuatro vientos mi profundo agradecimiento a la Universidad de Valladolid quien con su rector al frente me honra con la distinción más alta con la que puede soñar alguien que como yo ha dedicado muchos años, y no digo los mejores pues estos siempre están por venir, a la Universidad. Agradecimiento muy especial a mi admirado colega y amigo, Julio Alonso, a quien, en esta ocasión el afecto ha nublado su conocido rigor científico, por su brillante laudatio; llena más de generosidad que de realismo. Gracias a la facultad de Ciencias de la Universidad, en la que tantos grandes investigadores y distinguidos profesores trabajan.

La investigación teórica en física de materia condensada y física de radiaciones ha constituido el eje central de mi trabajo científico. La física es una materia muy variada, una disciplina que nos permite acercarnos a aspectos de la Naturaleza desde variados puntos de vista. Algunos físicos se concentran en la creación artificial de haces de partículas que rompen los bloques constituyentes más elementales de la naturaleza y revelan las simetrías internas ocultas de las partículas elementales. Otros se afanan en la creación de condiciones únicas de presión y temperatura para

así reproducir reacciones que de otra forma solamente ocurren en el interior de las estrellas. Hay quien vuelve sus ojos al cosmos buscando el comienzo de la gran explosión.

La exploración de lo más grande o de lo más pequeño puede ser contrastada con otro tipo de física, concretamente con el intento de entender el mundo ordinario aquí y ahora. Este tipo de exploración de la naturaleza real de los objetos "normales" tiene una fascinación intelectual, no menos atrayente y a veces más sutil que el de otros tipos de física.

Nuestro oficio es partir de las leyes simples de la física de los átomos y de los electrones e intentar entender toda la complejidad del mundo inmediato a nuestro alrededor. La hipótesis, o realidad atómica, está en el corazón de nuestro conocimiento de la materia. Uno de los grandes físicos de este siglo, el norteamericano Richard Feynmann se pregunta en sus ya clásicas 'Lecciones de Física':¹ *"Si en algún cataclismo se fuese a destruir todo el conocimiento científico y sólo se transmitiese una frase a la siguiente generación, ¿qué sentencia contendría la máxima información en el menor número de palabras?"*. La respuesta de Feynmann es la hipótesis atómica, que todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas moviéndose continuamente, atrayéndose los unos a los otros cuando se separan pero repeliéndose en cuanto se trata de apilarlos.

Al unirse, en la materia sólida o líquida, un número inmenso de partículas en interacción, aparecen propiedades nuevas: son las propiedades emergentes, propiedades que no son deducibles de las de sus constituyentes. La cantidad se convierte en calidad. 10^{23} átomos pueden hacer muchas cosas que un simple átomo no puede.

El entender las nuevas cualidades emergentes es el objetivo de la física de la materia condensada.

Uno de los pilares conceptuales de la física de la materia condensada es la manera en

¹ R.P. Feynmann, "The Feynmann lectures on physics", vol. 1, (1963)

que la complejidad de nuestro mundo ordinario, el del día a día, emerge de la simplicidad de la física atómica.

En un artículo famoso *"More is different"*² Phil Anderson afirma que *"La hipótesis reduccionista no implica de ninguna manera una "construccionista". La habilidad para reducir todo a leyes simples fundamentales no implica la habilidad de empezar de dichas leyes y reconstruir el universo. El comportamiento de agregados grandes de partículas "elementales" no puede ser entendido como una simple extrapolación de las propiedades de unas pocas partículas"*.

Quizás ésta sea una de las claves filosóficas de la ciencia de nuestro siglo: lo que observamos emerge de un substrato más elemental, es consecuente con las leyes físicas de los niveles anteriores pero ni se reduce ni se deduce directamente de ellas.³

Como en otros campos de la ciencia, el desafío intelectual de la física de la materia condensada radica en el gran número de grados de libertad que dichos sistemas presentan. Es necesario encontrar conceptual, matemática y experimentalmente, la manera de enfocar lo básico, allí donde tratamientos exactos son además de imposibles, irrelevantes.

Históricamente, la aplicación de la física cuántica al estudio de la materia condensada comienza con el estudio de las estructuras más sencillas, gases de electrones y materiales cristalinos. Gradualmente se extiende al estudio de materiales desordenados y a la comprensión del decisivo papel de las "imperfecciones", defectos, dislocaciones etc. Si hace cincuenta años el desafío intelectual de la física del estado sólido consistía en entender las propiedades de cristales perfectos de elementos, o compuestos simples y aleaciones, hoy alcanza sistemas más complejos; superficies, superconductores de alta temperatura, materiales magnéticos complejos: cristales desordenados, polímeros, vidrios, sistemas de dimensionalidad reducida.

El estudio de las superficies tarda en desarrollarse principalmente por la dificultad de controlar experimentalmente la composición de las mismas. El estudio

² P.W. Anderson, "More is different", pg. 393, vol. 177, pg. 393

³ P.M. Echenique, Physics Today 3186, December 1986

teórico avanza asimismo lentamente indicando la dificultad del problema, dificultad reflejada en la frase de Pauli: "*Dios hizo los sólidos y el diablo las superficies*". En los últimos años esta rama de la física adquiere una importancia decisiva pues es parte crucial de una nueva ciencia interdisciplinar, la ciencia de materiales. Ciencia que está experimentando una revolución espectacular.

En la actualidad es posible crear sistemas artificiales con una capacidad de control que alcanza el nivel atómico. Esta rama de la Ciencia está encaminada a producir materiales sólidos artificiales con determinadas propiedades específicas para una aplicación concreta.

Mis primeros pasos como investigador los doy en el grupo de teoría de la materia condensada (TCM) del Cavendish Laboratory de la Universidad de Cambridge. Desde los primeros años de la carrera de físicas había soñado con estudiar en Cambridge: La Universidad de Newton, Darwin, Maxwell, Dirac, Rutherford y tantos otros. La historia de la física está ligada al departamento de física de la Universidad, el famoso Laboratorio Cavendish. Allí hace poco más de cien años se descubrió el electrón y posteriormente el neutrón, así como la estructura de doble hélice del ADN. La rica y variada convivencia en los College (el mío durante el doctorado el Gonville and Caius College) y en los departamentos; el ambiente intelectual, la exigencia de calidad del grupo de teoría de la materia condensada (TCM), dirigida por los profesores Volker Heine y Phil Anderson, permanecen en mi memoria.

Los estudiantes de doctorado del TCM podíamos elegir director de Tesis. Tuve la fortuna de elegir a John Pendry. La suerte es muy importante en la carrera profesional de un científico. La buena suerte me ha acompañado casi siempre. El estilo de dirección de John Pendry, característico del Cambridge que he conocido, exento de paternalismo, proporcionando una gran libertad, abriendo opciones sin imponerlas, ha sido el que he intentado transmitir a mis estudiantes a lo largo de mi actividad universitaria. La misión de un profesor universitario no es moldear el espíritu del otro a nuestra imagen y semejanza, produciendo clones profesionales de nosotros mismos. Consiste en despertar el artista que el otro lleva dentro, extrayendo lo mejor

de sí mismo para que esculpa su obra, aunque sea contraria a nuestros criterios o deseos. La mejor influencia, lo único que perdura es despertar el afecto por lo que se hace, el amor por la materia, y el objeto de estudio.

Intentaré explicar lo más sencillamente posible algunas entre las citadas por el Profesor Alonso.

Los electrones no son solamente constituyentes esenciales de la materia, sino que tras su descubrimiento por el inglés J.J. Thomson en 1897 han sido utilizados profusamente como sondas para el estudio de la estructura de la materia. Einstein en 1905 con su explicación del efecto fotoeléctrico había establecido la naturaleza corpuscular de la radiación. El físico francés de Broglie pensando sobre todo en el electrón y tratando de establecer un paralelismo entre la materia y la luz, formuló lo que en 1923 era una hipótesis revolucionaria: a todo corpúsculo libre le corresponde una longitud de onda. Si esto es así los electrones producirían figuras de difracción similares a las que se observan con la luz si los hacemos pasar a través de rendijas del tamaño similar a su longitud de onda. Estas rendijas las proporciona la naturaleza: Son los materiales cristalinos, con "rendijas" del tamaño de los átomos, es decir Angströms (del orden de 10^{-10} m). En 1927 los norteamericanos C.J. Davisson y L.H. Germer observan la difracción de electrones por la superficie de un cristal de níquel.

Si la longitud de onda de los electrones es comparable a la distancia entre los átomos del cristal, la interferencia entre las ondas dispersadas por la estructura periódica del cristal hace que los electrones emerjan solamente en ciertas direcciones, produciendo puntos luminosos, reflejos de la simetría del material, análogos a los producidos mediante la difracción de rayos X. Davisson y Germer utilizaron electrones de baja energía (del orden de 100 electrón voltios) iniciando así lo que hoy día se ha convertido en uno de los instrumentos más poderosos en el estudio de la estructura atómica de las superficies. La difracción de electrones lentos, que se conoce con el acrónimo LEED (del inglés Low Energy Electron Diffraction), prueba la naturaleza ondulatoria del electrón.

Dificultades tecnológicas de obtención de alto vacío para evitar la contaminación atómica de las superficies, por un lado, y por otro la falta de comprensión teórica de los

mecanismos de interacción de electrones con la materia fueron los responsables de que hasta la década de los setenta la difracción de electrones lentos no se convirtiese en un instrumento de análisis atómico de superficies.

En la difracción de electrones lentos la fuerte interacción, tanto elástica como inelástica, de los electrones incidentes con el medio es decisiva. Debido a la fuerte interacción inelástica, el recorrido libre medio de los electrones LEED es pequeño (~ 10 Å), por lo que las figuras de difracción obtenidas son sensibles a la superficie, a diferencia de lo que ocurre con electrones de mayor energía. La interacción elástica fuerte permite volver los electrones hacia atrás, pero dificulta enormemente el análisis teórico al ser necesario considerar choques múltiples con los átomos y no existir, por tanto, una correspondencia directa entre la figura de difracción y la estructura atómica, tal como ocurre con la difracción de rayos X o de electrones de alta energía.

Mis primeros pasos se dirigen a intentar mejorar el potencial de interacción de los electrones LEED con los átomos del cristal. Desde el primer momento me pareció que el potencial de interacción debía depender de la energía, algo cierto, y que debido a ello la búsqueda y posterior introducción de dichos potenciales traería cambios sustanciales en las curvas de intensidad con respecto al voltaje de los diferentes rayos, algo que no fue cierto. Relativamente temprano pues en mi carrera científica me di cuenta de que intuiciones aparentemente obvias no lo son tanto cuando se contrastan cuidadosamente. Simultáneamente trabajaba en otros problemas relacionados con la estructura electrónica de superficies en los que tuve más suerte. Uno de ellos dio origen a la ecuación que con generosidad el profesor Julio Alonso ha calificado de conocida y que constituye mi primer artículo de investigación⁴.

Como tantas veces ocurre en ciencia y como a mi mismo me ha sucedido en varias ocasiones la importancia del trabajo fue mucho mayor en campos diferentes a los que lo originaron.

En aquellos años existían grandes discrepancias entre los cálculos teóricos de difracción de electrones rasantes (RHEED) en la superficie (111) del silicio y los resultados experimentales. Las discrepancias no podían ser debidas a errores en el

tratamiento de la interacción inelástica dentro del sólido pues las curvas teóricas daban correctamente la anchura de los picos del espectro. Nuestros cálculos explicaron que la diferencia entre teoría y experimento era debida a la excitación de plasmones superficiales (excitaciones colectivas del gas de electrones localizados en la interfase) durante el viaje del electrón fuera del sólido. Usamos un método semiclásico basado en el cálculo de la fuerza de frenado de un electrón moviéndose a lo largo de una trayectoria clásica. En aquel momento yo no veía claro como separar la componente disipativa de la que no lo era en el caso de una trayectoria general por lo que estudié el caso de un electrón moviéndose paralelamente a la superficie del sólido. Mi ignorancia resultó ser una bendición pues al forzarme a sustituir la situación real por un modelo ideal muy simplificado pude obtener una expresión compacta de la pérdida de energía en función de la distancia. Años después la fórmula así obtenida ha resultado clave en un campo bien diferente, el de la microscopia electrónica de barrido. (STEM)

STEM

El STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) aporta a la espectroscopía de pérdidas de energía la ventaja de la alta resolución espacial. En este aparato, un haz extremadamente estrecho (de unos 5Å de anchura) de electrones rápidos (típicamente 100 keV) incide sobre un material, pudiéndose desplazar con gran precisión la posición del haz sobre el objeto que se estudia. Los electrones que atraviesan la muestra se utilizan bien para formar imágenes de transmisión ("barriendo" la muestra con el haz), o bien para estudiar el espectro de pérdida de energía de los electrones en cada posición del haz. Las pérdidas se producen al excitar los electrones del haz tanto los electrones de valencia del blanco, como los electrones en las capas internas de los átomos de la red. Para que una de estas últimas excitaciones se produzcan, es necesario que el haz cruce muy próximo al átomo excitado, dado que la energía de la excitación es característica del átomo. El espectro de pérdidas permite obtener información sobre la naturaleza química de los átomos en una determinada posición de la muestra. Debido a la interacción con los átomos próximos aparecen pequeños cambios de la energía de la excitación respecto a los valores

⁴ P.M. Echenique and J.B. Pendry, J. Phys. C 8, 2936 (1975)

correspondientes a un átomo aislado; estos cambios permiten analizar el enlace químico de un átomo concreto.

Las pérdidas de energía debidas a la interacción con los electrones de valencia tienen diferentes características. Estas pérdidas son debidas a la energía necesaria para crear fluctuaciones de la densidad de carga en el volumen (plasmones de volumen) y en la superficie (plasmones de superficie) del blanco. Al ser éstas excitaciones colectivas, los electrones que se excitan están deslocalizados lo que plantea el problema de cuál es la resolución espacial de estos espectros, es decir, a qué distancia del blanco se excitan de forma significativa plasmones. Los plasmones de volumen sólo se excitan cuando la carga atraviesa el medio o cuando pasa a muy pequeña distancia de él (del orden de 1\AA), mientras que, en el caso de las excitaciones superficiales la resolución espacial viene dada básicamente por el alcance de la componente del potencial eléctrico -creado por el haz- de energía correspondiente a la excitación dada, típicamente del orden de unos 10 (nanómetros). Toda esta física está contenida en la fórmula sencilla que tuve la suerte de escribir. La energía de tales excitaciones depende de la naturaleza del blanco así como de su forma geométrica. Mientras que las imágenes filtradas a la energía del plasmón de volumen dan una imagen de la forma geométrica de la muestra, las imágenes correspondientes a plasmones de superficie son notablemente difusas, pero permiten observar detalles superficiales de gran interés, que no podrían ser detectados por medio de otras técnicas.

La espectroscopía de pérdidas de los electrones de la banda de valencia puede proporcionar información sobre estructuras superficiales. Respecto a la espectroscopía de electrones internos presenta una gran ventaja: debido a que la probabilidad de excitar electrones externos es mayor, la señal de pérdidas correspondiente es mucho más intensa, lo que supone que el tiempo de exposición necesario es menor. Con esto se reduce un problema esencial de la microscopía electrónica: el daño producido por el haz. De hecho se pueden obtener espectros de pérdidas de superficie en situaciones en las cuales el haz no atraviesa la muestra, produciendo un daño mínimo. Esta característica la convierte en una técnica de gran utilidad, por ejemplo, en el estudio de materiales biológicos.

En 1975 tuve la fortuna y el privilegio de coincidir en el Cavendish con el Profesor Ritchie quien ya en 1957 había anticipado la existencia de excitaciones colectivas localizadas en superficies planas. La colaboración con tan eminente investigador ha sido decisiva a lo largo de toda mi carrera. Su generoso liderazgo constituye un modelo difícil de seguir. La predicción fue confirmada rápidamente y al poco tiempo los investigadores utilizaban los plasmones superficiales como explicación única a multitud de fenómenos aparentemente dispares. El plasmón superficial es prácticamente omnipresente en la física de superficies y en el análisis cuantitativo de los distintos fenómenos que se producen en las interfases.

En las últimas tres décadas se ha llevado a cabo un amplio trabajo teórico y experimental en este campo. El plasmón superficial ha resultado ser un elemento importante en la holografía, diseño de nuevas células solares, diagnóstico de la superficie, diagnóstico de las uniones metal-óxido-metal, scattering Raman de superficie, diseño de redes de difracción y muchos otros temas.

La capacidad de la microscopía electrónica de barrido de dar información sobre nanoestructuras superficiales ha motivado el interés en aplicarla en superficies de diferentes geometrías. Estas superficies en general presentan un número infinito de modos, es decir de energías típicas de excitación superficial; la energía de estos modos es característica de la forma geométrica de la superficie. Alberto Rivacoba y colaboradores⁵ han desarrollado en la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea una teoría que permite abordar estos problemas de forma realista y eficaz.

Estados Superficiales

⁵ A. Rivacoba, N. Zabala and P.M. Echenique, Phys. Rev. Lett. 69, 3362 (1992)

En el interior de los materiales cristalinos la interacción de los electrones externos con los núcleos iónicos produce zonas del espectro de energía prohibidas, los llamados "gap". En dichas zonas de energía los electrones no pueden viajar por el sólido. En la superficie del material la situación es distinta; la discontinuidad en el potencial de interacción presente en la superficie puede resultar en una localización del electrón en las proximidades de la superficie. Los electrones en dicho estado no pueden penetrar dentro del sólido, pues éste presenta afinidad electrónica negativa, repele a los electrones y tampoco tienen energía suficiente para escapar al vacío. El potencial debido a la interacción de la carga externa con la carga de polarización que induce en la superficie les impide escapar al vacío, localizándoles en la superficie como en una especie de Fabry-Perot electrónico en el que la estructura de bandas del cristal, por un lado, y, por otro, el potencial de interacción, asintóticamente el potencial imagen, juegan el papel de los espejos ópticos en el Fabry-Perot tradicional.

El problema de la energía de ligadura y vida media de estados imagen incide directamente en la posibilidad de un gas de electrones bidimensional que podría lograrse mediante dichos estados.

En mi tesis doctoral en Cambridge y posteriormente en un artículo conjunto con John Pendry⁶ proponemos un modelo sencillo que contiene la física esencial del problema de los estados imágenes y que permite explicar claramente la energía de ligadura y la masa efectiva de dichos estados. Probamos asimismo un resultado general sobre la resolubilidad de la serie de Rydberg inducida por el potencial imagen. Demostramos que el espectro de Rydberg de las resonancias superficiales en superficies sólidas es resoluble, siendo la rápida variación de la fase de la reflectividad del potencial imagen la razón fundamental de dicho resultado.

En aquellos momentos los efectos de estas resonancias podían, en principio, observarse indirectamente en los experimentos de difracción de electrones como estructura fina en el rayo especular justo antes de la emergencia de otros rayos. Poco más que una curiosidad teórica.

Años más tarde surgen técnicas modernas de observación espectroscópica que, al menos yo, no había ni siquiera vislumbrado y el estudio de los estados imagen se convierte en tema central de investigación en muchos de los mejores laboratorios del mundo.

La fotoemisión inversa (o "bremsstrahlung spectroscopy") es una técnica ideal para estudiar los estados ligados a las superficies directamente, midiendo su energía y el momento mediante la energía y el momento del electrón incidente y la energía del fotón emitido. Los experimentos realizados con espectroscopia de dos fotones han permitido obtener resultados de alta resolución de la energía de ligadura y masa efectiva. Resultados que han permitido confirmar la validez de nuestras intuiciones y predicciones.

El advenimiento de potentes técnicas experimentales de fotoemisión de dos fotones resuelta en el tiempo y tecnología láser ultrarrápida han permitido recientemente realizar medidas precisas del tiempo de vida de estados electrónicos excitados en sólidos. La interacción responsable del corto tiempo de vida, del orden de femtosegundos, de este tipo de excitaciones electrónicas es la interacción con los electrones del sólido.

Los resultados experimentales confirman de forma clara las predicciones teóricas originales sobre la dependencia de la vida media con el índice del estado. Estos nuevos datos experimentales han provocado un salto cualitativo en el análisis teórico⁷.

En colaboración con miembros del grupo de investigación que dirijo en la actualidad y con el Dr. Angel Rubio de la Universidad de Valladolid hemos combinado la teoría de muchos cuerpos (en el marco de la cual se describe la interacción electrón-electrón) con una descripción "ab initio" de la estructura de bandas del sólido¹
E.V. Chulkov, I. Sarria, V.M. Silkin, J.M. Pitarke and P.M. Echenique, PRL 80, 4947 (1998)

⁶ P.M. Echenique and J.B. Pendry, J. Phys. C 11, 2065 (1978)

⁷ E.V. Chulkov, I. Sarria, V.M. Silkin, J.M. Pitarke and P.M. Echenique, PRL 80, 4947 (1998)

(la cual describe la interacción entre electrones y núcleos en sistemas periódicos) para así presentar, por primera vez, predicciones teóricas de los tiempos de vida en metales simples y nobles⁸.

Estas investigaciones han constituido un paso decisivo en el estudio de la dinámica de electrones y huecos en sólidos, y resultan, por lo tanto, claves para entender diversos procesos químicos en superficies, tales como disociación, desorción y reactividad. Descripciones detalladas de la estructura electrónica de superficie y su cotejo detallado con los experimentos han permitido avanzar en la comprensión del apantallamiento dinámico de las superficies, aspecto esencial en la reciente química del femtosegundo en superficies. El conocimiento adquirido ha sido clave para entender la vida media de huecos en estados superficiales. Este trabajo liderado por el Prof. Eugene Chulkov de la UPV/EHU ha resuelto una larga controversia en física de superficies⁹. La dinámica de las excitaciones electrónicas juega un papel importante en la interacción molécula-superficie así como en reacciones inducidas por láseres y es también crítica en aplicaciones tecnológicas de materiales electrónicos.

Interacción de partículas con la materia

Cuando un ion rápido en comparación con la velocidad de los electrones externos del medio (estos se mueven unas 137 veces más lentamente que la luz) atraviesa la materia condensada, este medio responde a la presencia de la carga añadida. La entrada del ion origina reajustes transitorios de los estados de los electrones y cambios en la carga del ion. El ion puede perder alguno de sus propios electrones, o capturar otros electrones de valencia, o de capas internas de los átomos que constituyen la materia. Además, por efecto de la interacción del ion con los electrones de valencia del medio, éste se polariza, de forma que el potencial de Coulomb, responsable de las interacciones entre las cargas, queda dinámicamente apantallado, lo que perturba los estados de los electrones ligados al ion y los procesos

⁸ I. Campillo, J.M. Pitarke, A. Rubio, E. Zarate and P.M. Echenique, PRL 83, 2230 (1999)

I. Campillo, A. Rubio, J.M. Pitarke, A. Goldmann and P.M. Echenique PRL 86, 3241 (2000)

⁹ J. Kliewer, R. Berndt, E.V. Chulkov, V.M. Silkin, P.M. Echenique and S. Crampin. Science 288, 1399 (2000)

de captura y pérdida de electrones. Se crea, pues, una compleja secuencia de fenómenos tanto temporal como espacialmente.

Se pueden producir estructuras de polarización coherente, debidas a la localización instantánea del ion. El atravesar la superficie da lugar a una perturbación oscilatoria de la densidad superficial de carga. Se crea una estela oscilatoria debida a las fluctuaciones de la densidad de carga, que tiene una precisa analogía con la estela que deja un barco al moverse. Las colisiones cercanas del ion con electrones crean electrones secundarios, así como cascadas de electrones Auger en las capas internas del ion o de los átomos del medio y cascadas de pares electrón-hueco en los electrones de valencia.

La interacción de un ion con un medio de baja densidad electrónica, da lugar a procesos igualmente complejos: de nuevo se producen excitaciones superficiales, y los llamados electrones convoy -electrones que acompañan al ion moviéndose con su misma velocidad aproximadamente - pueden acompañar al electron al emerger este del medio. La captura de electrones en las proximidades de la superficie puede dar lugar a cascadas de electrones Auger.

El problema de una partícula moviéndose a través la materia condensada supone un sistema acoplado de gran complejidad, que representa un profundo desafío para la comprensión física y la interpretación teórica. El estudio de estos sistemas proporciona gran cantidad de información sobre las propiedades estáticas y dinámicas del medio y de la propia partícula incidente.

En los problemas de interacción de iones con la materia y en muchos otros temas, la colaboración y el liderazgo del Profesor Fernando Flores ha sido clave a lo largo de mi vida profesional.

Hemos estudiado en detalle, usando teoría de respuesta lineal la densidad de fluctuaciones inducida por el ion, así como el potencial de estela producido por ellas¹⁰. Dicho potencial tiene una influencia decisiva en diversos fenómenos físicos de gran

interés, tales como la excitación resonante coherente, pérdida de energía (energía de frenado), efecto vecindad, apantallamiento dinámico de iones en sólidos y en aceleradores basados en el campo creado por la estela.

Los modelos existentes del potencial de estela suponían que el sólido es un medio infinito homogéneo y no tenían en cuenta los efectos de las superficies de entrada y salida del sólido. García de Abajo¹¹ ha evaluado de forma coherente y sistemática el proceso de formación (destrucción) de estela cuando el ión penetra (o sale) del sólido, explicando de forma detallada la contribución relativa de las excitaciones colectivas de volumen y superficiales en función del tiempo que le cuesta al ión entrar (o salir) en el sólido.

Análisis mecánico-cuánticos basados en la teoría de perturbaciones de primer orden conducen a resultados para la energía de frenado que son proporcionales al cuadrado de la carga del proyectil. Ya en 1963 Barkas comprobó que cargas positivas y negativas tienen alcances diferentes al atravesar la materia, mostrando así evidencia experimental de que la pérdida de energía depende del signo de la carga de la partícula incidente. Recientes experimentos han mostrado asimismo diferencias entre las pérdidas de energía de protones y antiprotones, permitiéndose, por lo tanto, extraer la contribución a la pérdida de energía que es proporcional al cubo de la carga del proyectil.

Numerosos autores con diferentes métodos han aportado diversas aproximaciones a la solución del efecto Barkas. El primer tratamiento mecano-cuántico riguroso en un gas de electrones dentro de la aproximación de fases aleatorias fue realizado hace pocos años por el profesor Pitarke¹² y sus colaboradores en la Universidad del País Vasco. Su trabajo constituye un paso decisivo en el tratamiento de la interacción de muchos cuerpos en gases de electrones y ha proporcionado por primera vez expresiones compactas para la respuesta cuadrática del gas de electrones equivalentes a las realizadas, en su día, por Lindhard para la respuesta lineal.

¹⁰ P.M. Echenique, F. Flores and R. H. Ritchie. *Solid State Physics* 43, 229 (1990)

¹¹ J. García de Abajo and P.M. Echenique, *Phys. Rev B* 46, 2663 (1992)

Cuando la velocidad del ion es menor que la de los electrones del medio, la situación es cualitativamente diferente debido a que la interacción es demasiado fuerte, por lo que técnicas basadas en teoría de respuesta lineal no tienen tanta validez como en el caso descrito anteriormente. Adaptamos a esta situación el formalismo del funcional de la densidad, lo que nos permitió obtener el primer cálculo no lineal de la pérdida de energía de un protón en un gas de electrones¹³. En medios sólidos con muchos electrones no localizados, la carga del ion se apantalla por el movimiento de dichos electrones. La interacción residual, cuando la velocidad de la partícula es pequeña, excita los electrones a órbitas vacías y cercanas a la superficie de Fermi.

Estas ideas se inician durante mi estancia en la Universidad de Barcelona. En Barcelona colaboré, acompañado de excelentes compañeros en un brillante proyecto universitario liderado por Pedro Pascual. Siempre recuerdo con afecto y gratitud su generosidad durante mi estancia, en circunstancias difíciles, en la ciudad Condal.

Los cálculos no lineales muestran una pérdida del orden del 60% mayor, para densidades metálicas, que los resultados de la teoría lineal. Asimismo, el cálculo autoconsistente del potencial de interacción, por un lado, y el tratamiento exacto del "scattering" en el nivel de Fermi, permiten explicar, desde primeros principios, las oscilaciones en la pérdida de energía en función de la carga del ion incidente¹⁴. Recientemente, en 1998, los trabajos del grupo experimental del Prof. Winter en Berlín han confirmado la validez de nuestras predicciones¹⁵.

El carácter atómico que presenta la densidad electrónica de carga en torno a una impureza presente en un metal ha sido también objeto de estudio en relación con el problema de la interacción de iones multicargados con sólidos. Es este un campo de creciente interés, debido al desafío que representa desde un punto de vista fundamental. La interacción de un ion desnudo o casi desnudo con una superficie es un proceso complejo en el que se suceden situaciones físicas diferentes que van

¹² J.M. Pitarke, R.H. Ritchie and P.M. Echenique, PRB 52, 13883 (1995)

¹³ P.M. Echenique, R. M. Nieminen and R.H. Ritchie. Solid State Communications 37, 779 (1981)

¹⁴ P.M. Echenique, R. M. Nieminen, J.C. Ashley and R.H. Ritchie. PRA, 33, 897 (1986)

¹⁵ H. Winter, C. Auth, A. Mertens, A. Kirste and M.J. Steiner, Europhysics Letters 41, 437 (1998)

desde la formación de átomos huecos al acercarse al sólido (átomos neutros que han capturado electrones en orbitales de elevado número cuántico n) hasta la renovada pérdida de electrones al atravesar la superficie que deja a la partícula con una elevada energía potencial en el interior del metal. Al estudiar los rapidísimos procesos de captura de electrones por parte del ion incidente es necesario representar adecuadamente la densidad electrónica inducida en torno a ella con el objeto de apantallar la intensa interacción. Los trabajos realizados por Andrés Arnau¹⁶ y colaboradores en nuestro grupo lideran la investigación teórica en este campo.

CONCLUSION

Cualquier persona culta conoce bien las consecuencias económicas de la actividad científica. No debemos, sin embargo, defender la Ciencia solamente en términos utilitaristas por los dólares que produce. Si así lo hacemos no podremos quejarnos que otros impropriamente lo hagan. Es importante resaltar el valor cognitivo de la ciencia, su capacidad de despertar nuestra imaginación. La ciencia es una aventura intelectual, una parte esencial de la cultura moderna que ha revolucionado nuestra concepción del mundo y de nosotros mismos. Surge de la búsqueda libre de saberes básicos. Libertad que tanto en Ciencias de la Naturaleza como en cualquier otro campo de la cultura debe ser siempre protegida.

En palabras de un gran universitario Francisco Tomás y Valiente “...*Cuando se nos pregunte desde fuera de la Universidad para qué sirven determinadas áreas de conocimiento, por qué se investiga en ciertos proyectos o líneas de trabajo, no hay que buscar respuestas vergonzantes en términos pragmáticos, sino proclamar con orgullo y sin vergüenza que ésta es la institución donde desde hace siglos (más de siete en ciertos casos) se piensa sin condiciones ni límites, se aprende a dudar metódicamente, se investigan saberes aparentemente inútiles sin los cuales no habría ni ciencia ni cultura, ni vida en verdad humana. Una institución que sólo ha sido grande cuando en ella se ha pensado con, desde y sobre la libertad.*”

Me gustaría resaltar que muchas veces la grandiosa aplicación tecnológica,

¹⁶ A. Arnau, et al. Surface Science Reports 27, 113 (1997)

industrial y económica de la física de la materia condensada no ha sido el objetivo inmediato de los investigadores. Estos actuaron libremente movidos por la curiosidad. La curiosidad por entender los semiconductores llevó al transistor. La misma curiosidad es la que ha aportado el microscopio túnel.

Esta actitud que he visto en los Departamentos de Valladolid es la que tenemos en el nuestro. La misma con la que me incorporé a la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea en 1986. A lo largo de estos años hemos tenido la ayuda ejemplar de las Instituciones Vascas. En el agradecimiento al Consejero de Educación del Gobierno Vasco, Sr. D. Ignacio Oliveri quién hoy nos honra con su presencia, englobo muchas deudas.

La empresa privada apostó por nosotros. La generosa ayuda de Iberdrola ha acompañado siempre mis proyectos. Las apuestas surgen de personas concretas, capaces de asumir riesgos. Yo quiero proclamar aquí, en público, algo que en privado ya le he dicho al Presidente de Gamesa y Vicepresidente de Iberdrola y de COTEC. Al hacerlo no hago más que seguir el consejo de Cervantes: La ayuda , el empuje y la visión de José Antonio Garrido han sido decisivas en mi trabajo científico.

Tanto las instituciones como la empresa siempre protegieron nuestra libertad de investigación, conscientes de la necesidad de respetar los mecanismos sutiles que vertebran la actividad investigadora. Más importante y sobre todo más rentable que fijar objetivos a la ciencia es crear las condiciones, el caldo de cultivo en el que ésta pueda florecer.

Es necesario apostar por los investigadores creando las condiciones necesarias para su trabajo. Condiciones de infraestructura técnica, libertad científica y de creación personal, así como la posibilidad de mejorar y desarrollarse profesionalmente de acuerdo a sus contribuciones y no a su pertenencia a un determinado grupo o entorno. En una política de Ciencia y Tecnología es importante la continuidad y la visión a largo plazo. Inestabilidades en el sistema de financiación convierten en imposible el logro de una masa crítica de científicos, el atraer de forma responsable a jóvenes valores, o emprender proyectos difíciles de larga duración. Los jóvenes van a ser decisivos en

una economía basada cada vez más en ciencia, tecnología e innovación. Son a la capacidad innovadora de un país lo que los mosquitos a la malaria.

Antes de terminar, expresar concisamente mi agradecimiento. No por breve menos sentido. Agradecimiento muy especial a todo mi grupo, a mis colaboradores y estudiantes, todos amigos. Sería demasiado largo citarlos personalmente, pero a todos, uno a uno, los tengo presentes en este momento. Los miembros del Departamento de Física de Materiales, dirigido a lo largo de estos años por Juan Colmenero y Angel Alegría, han convertido con su generosidad y eficiencia el Departamento en un lugar ideal para el trabajo y la investigación.

Interpreto este gran honor como un reconocimiento a la madurez intelectual e investigadora de mi Universidad, la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea en la que me encuentro tan a gusto. Gracias a su Rector que hoy nos acompaña.

Termino estas palabras con un emocionado agradecimiento a mi familia, a nuestro padre que siempre estuvo orgulloso de su profesión de médico, y de la Universidad en la que se graduó. La orla de Valladolid, del año 1934 permanece en el despacho de casa. A nuestra madre y a toda mi familia: a mi esposa Montserrat e hija Ainhoa que son mi alegría de vivir. Muchas gracias a todos.