

RECEPCION ACADEMICA

DISCURSO DE INCORPORACION DEL *DOCTOR ROMER NAVA CARRILLO*

*Señor Presidente de la Academia de Ciencias Físicas,
Matemáticas y Naturales,
Señores Académicos,
Señoras y Señores.*

Doy inicio a este discurso de incorporación manifestando que me siento sumamente honrado de ocupar un sillón de esta ilustre Academia. Pienso que el honor sobrepasa mis modestos logros científicos y como dijera en la ocasión de mi elección, es menos sobrecogedor para mí aceptar la alta distinción de ocupar el Sillón N° III, como un reconocimiento de esta venerable Corporación a la nueva comunidad científica nacional. Me refiero a los colegas quienes desde la década de los años 50, han hecho del ejercicio de la investigación, de su fomento en el país y de su proyección en el ámbito internacional, razón exclusiva de su ser y quehacer.

Hoy me complace reiterar públicamente, y ante los apreciados amigos y queridos familiares que generosamente me acompañan en este acto de tanta trascendencia en lo personal, mis sentimientos de gratitud a los muy distinguidos y apreciados académicos que avalaron mi postulación como Individuo de Número, y al muy honorable Quórum que apoyó irrestrictamente mi elección.

Debo extremar la tolerancia de la distinguida audiencia para incluir una nota personal, ineludible aún en esta solemne ocasión, que expresa mi profundo agradecimiento a quienes debo mucho amor y la ilimitada comprensión y tolerancia a mi dedicación al estudio: ...mi madre, mi esposa y mis hijos... Sin el aliento de estos seres tan queridos poco útil hubiera podido realizar.

Cumplo a continuación el honroso y grato deber de hacer un merecido elogio a mi distinguido antecesor en el Sillón N° III, el Dr. José Lorenzo Prado Castillo, como un homenaje a su memoria.

El Dr. José Lorenzo Prado Castillo nació en San Fernando de Apure el 7 de agosto de 1902 y realizó todos sus estudios universitarios en la Universidad Central de la cual recibió los títulos de Farmacéutico en 1929 y de Experto Químico en 1930. Después de la creación de la Facultad de Farmacia, presentó una tesis para obtener, en 1941, el título de Doctor en Farmacia.

Paralelamente a la docencia en la Universidad Central desde 1926 hasta 1953, el Dr. Prado realizó una muy distinguida labor profesional y científica en la Química Aplicada. Fue miembro del Laboratorio Nacional, dependiente para entonces del Ministerio de Fomento, al cual ingresó en calidad de Químico Analítico en 1936 y llegó a desempeñarse como su Director desde 1942 hasta 1951. En esta última fecha el Laboratorio fue adscrito al recién creado Ministerio de Minas e Hidrocarburos, como la Dirección de Investigaciones Químicas, también bajo la jefatura del Dr. Prado hasta 1957. Fue en ésta calidad de Director que tuve el honor de conocerlo y de recibir sus sabios y oportunos consejos sobre mi futura educación universitaria.

De sus trabajos científicos se destacan varios estudios acerca de la composición química y de la radioactividad de fuentes termales de la Cordillera de la Costa; así como un estudio de los petróleos crudos venezolanos. La actividad profesional del Dr. José Lorenzo Prado revela un permanente interés por el desarrollo de la Farmacia y de la Química en el país, con especial atención hacia el estudio y promoción de la producción industrial y del control de su calidad.

Como servidor de la administración pública, el Dr. Prado desarrolló una tesonera y competente actividad, que culmina en su gestión como Ministro de Minas e Hidrocarburos en 1958. Su labor fue ampliamente reconocida a través de merecidas condecoraciones, incluida la más alta distinción de la República, el Gran Cordón de la Orden del Libertador, que le fue conferida en 1959.

Su trabajo de incorporación a esta Academia, presentado en abril de 1964, es una valiosa contribución al estudio de la historia de la Química en el país. En él destaca la gestión de nuestro primer investigador en Química, el Dr. Vicente Marcano, en la creación del Laboratorio Municipal en 1890, y se describe la evolución de este primer instituto de Química hasta la formación del ya mencionado Laboratorio Nacional.

El Dr. José Lorenzo Prado se desempeñó como Secretario de la Academia de 1964 a 1982 y fue además Secretario de las Academias Nacionales desde 1968 hasta 1982.

Personalmente tuve la oportunidad de apreciar el carácter firme pero jovial del Dr. Prado, su espíritu de lucha y su valeroso orgullo ante el deber cumplido a la Nación. Estas notables cualidades de su larga y fructífera existencia hacen imperecedero su recuerdo a quienes tuvimos el privilegio de conocerlo.

Paso ahora a referirme al trabajo de incorporación que he presentado a esta Academia, el cual contiene el resultado de las investigaciones que hemos realizado durante estos últimos años en el Laboratorio de Temperaturas Bajas del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). En estas labores he contado con la inestimable colaboración de colegas y estudiantes del mismo IVIC y de las Facultades de Ciencias y de Ingeniería de nuestra Universidad Central; con ellos tengo el honor de compartir la autoría de muchas de las publicaciones resultantes de las investigaciones. A todos ellos deseo confirmar mi permanente gratitud.

Del título del trabajo: *“Transiciones Túnel en Sólidos Desordenados: Aplicaciones a las Propiedades Crioultrasónicas del Cuarzo Irradiado y del Cuarzo Amorfo”* se infiere que se trata de una investigación acerca de física de los materiales sólidos de naturaleza especializada y sería abusivo de mi parte, en las presentes circunstancias, tratar de profundizar en los aspectos técnicos de la investigación. La enorme extensión de la ciencia moderna nos ha forzado a una especialización extrema; la situación en la Física contemporánea, por ejemplo, se podría describir con la siguiente frase de Jorge Luis Borges... *“A nadie le está dado recorrer más de una parte infinitesimal del palacio. Algunos no conocen sino los sótanos...”* No obstante la aserción borgeana, abrigo la esperanza de que los comentarios histórico-divulgativos que haré a continuación sobre el tema del trabajo, contribuyan en forma sencilla a ilustrar algunos aspectos de interés más general.

El estudio de los materiales ha ocupado la atención del hombre desde tiempos remotos, puesto que el desarrollo de las sociedades debe mucho a la explotación y beneficio de aquellos. No es exagerado afirmar, adicionalmente, que muchas revoluciones de la historia han estado vinculadas al descubrimiento o al dominio por el hombre de algún material, como por ejemplo: la piedra, el bronce, el hierro, el papel y más recientemente, el carbón, el petróleo, el uranio y el silicio.

Los experimentos reportados en el trabajo fueron realizados en materiales sometidos a las temperaturas del Helio líquido, alrededor de unos 4 grados sobre el cero absoluto, es decir, unos 269 grados

centígrados bajo cero. A estas temperaturas criogénicas, que derivan su calificativo del griego *Kryos* por frío, se reducen considerablemente los efectos perturbadores de la agitación térmica de la materia y se hace posible el estudio de fenómenos que requieren de muy pequeños intercambios de energía. La investigación mencionada comprende un estudio de la propagación de ondas de ultrasonido en dos formas sólidas de un material muy abundante en la naturaleza. Se trata del Dióxido de Silicio, mejor conocido como la Sílice, el compuesto que forma los granos de la arena común. Las dos formas o fases sólidas estudiadas en el trabajo, como veremos, representan extremos opuestos del ordenamiento en el espacio de los átomos del compuesto químico.

En el primer caso se trata de una de las formas cristalinas más conocidas de la Sílice: el Cristal de Cuarzo. Este material es relativamente abundante en las montañas que rodean nuestra ciudad, en la forma de agujas hexaédricas de cristal de roca terminadas en cúspides. En un cristal como el Cuarzo los átomos se disponen de manera muy ordenada, formando diminutas celdas espaciales, llamadas *Celdas Primitivas*, que se repiten en el espacio hasta ocupar todo el volumen del sólido. La apariencia del conjunto es la de una red tridimensional de microscópicos poliedros idénticos, como las celdas de un panel:

Es por esta regularidad atómica de su estructura que los cristales se presentan en la naturaleza en las bellas formas sólidas regulares que llamaron tanto la atención de los antiguos. Los griegos dieron al Cuarzo el nombre de *Krystallos* porque creían que el material era una forma particular de hielo. 77 años antes de Cristo, en su célebre Historia Natural, Plinio el Viejo daba como argumento en favor de esta equivocada noción, el hecho de que el *Crystallum* sólo se encontraba donde la nieve del invierno se condensaba en la forma de hielo cristalizado. El erudito romano destacaba la simetría hexagonal de los cristales de Cuarzo, maravillándose de la planitud y brillo de sus facetas que según él, ningún lapidario en el mundo sería capaz de reproducir. El nombre de *Crystallum* por Cuarzo se mantuvo hasta el siglo XVII cuando el término Cristal tomó su acepción genérica para designar la forma cristalizada de cualquier material.

Hoy se acepta, aunque sin una prueba general, que un cristal sin imperfecciones, como las más apreciadas gemas, es el estado de mínima energía de un conjunto de átomos en el cero absoluto. Sin duda esta perfección representa el máximo ordenamiento posible de la materia agregada y es por esa exquisita y simplificadora simetría que los cristales han sido, por muchos años, el objeto de estudio por excelencia

de los físicos que estudian la materia condensada, los físicos del estado sólido. En el trabajo se estudian las propiedades ultrasónicas de los cristales de cuarzo, pero esta vez sometidos a la acción ionizante y desordenadora, respectivamente, de la radiación gamma y de los neutrones de un reactor. Puesto que, como dijera el crítico inglés Ruskin, las imperfecciones hacen todas las cosas mejores, más bellas y más apreciables.

El segundo material estudiado en las investigaciones es un sólido amorfo que ha sido de gran importancia para la sociedad: el Vidrio de Sílice. En un vidrio los átomos están dispuestos totalmente al azar en el volumen del sólido, sin relación alguna entre sus separaciones o sus orientaciones relativas en el espacio. Por la manera de fabricarlo, en un vidrio se congela el desorden atómico de la fundición o líquido que le da origen y adquiere la rigidez de un sólido en virtud de su altísima viscosidad; pero una vez constituidos, los vidrios persisten por largos períodos en su inestable desorden. Una confirmación reciente de esta persistencia son los vidrios traídos de la Luna, inmutados desde hace miles de millones de años.

Llama la atención que la física de la materia condensada no disponga aún de una cabal comprensión microscópica de las propiedades de un material que, como el vidrio, ha sido testigo y factor de la evolución de nuestras sociedades desde hace milenios. El hombre aprendió a fabricar vidrios mucho antes de la aparición de los tratados sumerios para su preparación y fue capaz, en el transcurso de los siglos, de avanzar su tecnología mucho antes de dominar su ciencia, legándonos, como testimonios elocuentes de su ingenio técnico: Desde los bellos vitrales rosáceos de Chartres hasta las supertransparentes fibras ópticas de las comunicaciones de mañana. Una de las razones de esa ausencia de una teoría microscópica de los vidrios es, desde luego, la falta total de orden o simetría que presentan aún a nivel molecular, lo cual hace más difícil el tratamiento analítico de su física; aunque también cabe recordar que hace relativamente poco tiempo que los físicos han redescubierto los sistemas desordenados. No obstante, la última década ha visto un crecimiento vertiginoso de las investigaciones en la física del desorden que unifica tópicos tan diversos, como los sólidos estructuralmente amorfos, los sólidos con magnetismo atómico al azar y la mecánica estadística de las rocas sedimentarias y la de las redes neuronales de la futura computación.

La motivación principal detrás del presente estudio comparativo de las dos fases sólidas de la Sílice: la amorfa y la cristalina progresivamen-

te desordenada por las radiaciones, es el interés por comprender, a un nivel microscópico, porque los vidrios presentan una universalidad de sus propiedades criofísicas, es decir, de sus propiedades a temperaturas bajas. Es el caso que los trabajos experimentales y teóricos de las últimas dos décadas han logrado establecer que estas propiedades criofísicas están determinadas por un fenómeno atómico, descubierto a finales de los años 20, el cual se conoce con el nombre de El Efecto Túnel.

El Efecto Túnel ha sido una de las ideas más fructíferas de la física moderna y ha resultado en muy importantes aplicaciones prácticas a las cuales nos referiremos más adelante. Su utilización para el entendimiento de variados fenómenos físicos ha sido muy frecuente y su temprana manifestación experimental en campos tan diversos como la física molecular, la física nuclear y la física de los sólidos, se consideró como uno de los triunfos iniciales de la Mecánica Ondulatoria, creada por Erwin Schroedinger en 1926.

Suele suceder cuando un gran avance científico induce una intensa actividad en diversos grupos de investigación del mundo, como ocurrió con la invención de esa nueva física de la materia atómica y subatómica, que subsista una cierta imprecisión acerca de la cronología de los descubrimientos. En el caso del efecto túnel tal imprecisión se extendió hasta 1976; hoy se acepta históricamente que los trabajos teóricos de Friedrich Hund en 1927, acerca de la estabilidad de las moléculas del Amoniaco, constituyen el primer estudio del efecto túnel. Esta contribución de Hund antecede los estudios del efecto túnel de los electrones de un metal, por Nordheim y de los del átomo de Hidrógeno, por Oppenheimer, ambos en 1928; pero también precede la muy celebrada explicación del decaimiento radioactivo, por el efecto túnel en ciertos núcleos atómicos, debida a Gamow en ese mismo año.

La concepción del efecto túnel es pues contemporánea con la Mecánica Ondulatoria o Mecánica Cuántica, como hoy se le llama, y tiene su origen en la predicción de esta teoría según la cual, una partícula puede pasar a través de una barrera de energía que le sería impenetrable desde el punto de vista de la física pre-cuántica del siglo pasado. *La Mecánica Cuántica* explica el carácter ondulatorio de las partículas materiales, las célebres ondas de materia sugeridas por de Broglie, que posteriormente Schroedinger descubrió como formular en una teoría matemática precisa. Es esta naturaleza ondulatoria de las partículas materiales lo que explica ese singular fenómeno cuántico que es el efecto túnel.

Es por medio del efecto túnel que se logra establecer una pequeña corriente eléctrica entre dos metales separados por un vacío. Por ejemplo, entre dos láminas metálicas separadas por una pequeñísima distancia de unos pocos Angstroms o entre una de las láminas y la punta muy fina de una aguja metálica, también separadas por un intersticio atómico al vacío (Un Angstrom es aproximadamente igual al diámetro de un átomo liviano, más exactamente, es un diez mil millonésimo de un metro). El establecimiento de esta diminuta corriente túnel se explica porque, desde el punto de vista de la física cuántica, los electrones de un metal no son simplemente las diminutas partículas eléctricas de la física clásica, sino que se comportan como ondas de materia relativamente extendidas en el metal. Por lo tanto, no están estrictamente confinados al interior del metal, sino que forman una nubecilla que se extiende varios Angstroms más allá de la superficie exterior. Una batería que se conecte entre los dos metales hace que los electrones puedan pasar de un metal al otro, como si perforasen un túnel a través de la barrera de energía que constituye el pequeño intersticio al vacío entre ellos. Lo anterior es un ejemplo sencillo del efecto túnel de los electrones de un metal, el efecto también se manifiesta cuando un átomo de una molécula o de un sólido, pasa de una posición a otra perforando la correspondiente barrera de energía mediante una transición túnel.

Pero no es sólo en la comprensión de ciertos fenómenos físicos fundamentales que el efecto túnel ha sido de gran importancia; varios dispositivos, varios inventos importantes tienen su base en dicho efecto.

Podemos citar, por ejemplo, que ya en 1937 se concibió la idea de utilizar la emisión túnel de los electrones de un metal para una nueva microscopía. Esta idea finalmente condujo a la realización práctica del *Microscopio Iónico* por el Profesor Erwin Muller, en la década de los años 50. Este instrumento es capaz de una resolución de pocos Angstroms y permite observar directamente, sobre una pantalla fosforescente, el orden cristalino de los átomos que forman la punta muy aguda de un electrodo metálico. Es interesante recordar en esta ocasión, que uno de estos microscopios fue utilizado en el IVNIC por el mismo Profesor Muller en 1957.

Rápidamente se sucedieron otras aplicaciones importantes del efecto túnel entre las cuales están, por ejemplo:

- La invención en 1957, del *Diodo Túnel* a base de semiconductores, de amplio uso en la electrónica moderna.

- El descubrimiento, en 1960, de transiciones túnel en metales superconductores.
- La predicción, en 1962, del acoplamiento débil entre superconductores separados por una barrera túnel delgada. Estas *Uniones de Josephson* serían los dispositivos principales de un futuro computador basado en superconductores.

Destaca la importancia técnica de estas tres aplicaciones del efecto túnel, el señalar que sus respectivos originadores: Leo Esaki, Ivan Giaever y Brian Josephson, compartieron el premio Nobel de 1973.

- Más recientemente, en 1986, los inventores del *Microscopio Túnel de Barrido*, Heinrich Rohrer y Gerd Binnig, también se hicieron acreedores del preciado galardón por su importante aplicación del efecto túnel. Este novel y relativamente sencillo microscopio produce imágenes tridimensionales del relieve de una superficie con una resolución lateral de 1 a 2 Angstrom, es decir, puede resolver los átomos individuales de una superficie; también es capaz de discernir diferencias de relieve de tan sólo unas 5 centésimas de Angstrom. El microscopio túnel de barrido promete importantes aplicaciones en la ultramicrolitografía electrónica, en el estudio a una escala atómica de los fenómenos de la corrosión y de la catálisis y por supuesto, en la biología molecular.

Como se mencionó anteriormente, también el comportamiento de los vidrios a bajas temperaturas se explica recurriendo al efecto túnel. Desde principios de la década de los años 70, se realizaron experimentos sistemáticos muy importantes acerca de las propiedades de los vidrios a temperaturas inferiores a un grado absoluto. Así se comprobó que, inesperadamente, estas propiedades resultaron muy diferentes a las de los cristales; y como se demostró en muchos laboratorios del mundo, dichas propiedades son de una sorprendente uniformidad para muchos vidrios, por ejemplo: para los vidrios de Sílice, para los vidrios orgánicos como el Polietileno amorfo y para los metales vítreos o vidrios metálicos. Esta inesperada universalidad de las propiedades criofísicas de los vidrios y en particular, su independencia en la composición química, produjo un revuelo de interés entre los físicos de la materia condensada porque, en palabras del mismo profesor Pohl, de la Universidad de Cornell en Ithaca, Nueva York, en cuyo laboratorio se realizaron experimentos muy relevantes ... "*Cualquier modelo que pretendiese explicar las anomalías, debería ser en extremo sencillo para*

que resultase igualmente aplicable a muchos, sino a todos los sólidos no - cristalinos”...

El modelo teórico finalmente aceptado para los vidrios es el *Modelo Túnel*, que se conoce también como el Modelo AHVP, por sus autores, los físicos Anderson, Halperin y Varma de la IBM de Nueva York e independiente Phillips, entonces en la Universidad de Stanford en California y fue desarrollado en 1972. Este modelo parte de la hipótesis de la existencia en los vidrios de ciertas partículas atómicas o de grupos de ellas que pueden penetrar barreras de energía por medio del efecto túnel.

En el estudio de las propiedades anómalas de los vidrios las técnicas ultrasónicas han sido de mucha utilidad y la parte experimental que se reporta en el Trabajo de Incorporación, se llevó a cabo mediante las técnicas crioultrasónicas que se describen detalladamente en la monografía presentada en la ocasión de mi ingreso como Miembro Correspondiente de esta Academia. En 1971 me encontraba de licencia sabática en Garching, un pueblo aledaño a Munich, en el laboratorio de mi tutor y buen amigo, el Profesor Klaus Dransfeld, entonces en la Universidad Técnica de Munich. Así tuve la buena fortuna de participar en la comprobación experimental del fenómeno de la transparencia de los vidrios a las ondas ultrasónicas de alta intensidad. Estos experimentos y los reportados muy poco tiempo después por investigadores de la IBM de Nueva York, fueron decisivos en la aceptación del modelo túnel propuesto para los sólidos amorfos.

Recapitulando, muchos de los experimentos en los últimos 18 años confirman la existencia de los centros túnel en los vidrios y se dispone de una descripción fenoménica adecuada de la universalidad de sus propiedades crio-físicas, que podría expresarse de la siguiente manera: Como los átomos de un vidrio no ocupan las posiciones prescritas por alguna simetría cristalina, cabe la posibilidad de pequeños rearrreglos locales de su configuración espacial. Las transiciones túnel entre estas configuraciones, cuasi-equivalentes en energía, son las responsables del comportamiento anómalo, que naturalmente debe ser común a todos los vidrios. Pero hasta hoy, a casi dos décadas de los experimentos pioneros de Ithaca y de Garching, y de la formulación del modelo teórico, la naturaleza microscópica de los centros túnel permanece en el misterio; no se sabe a ciencia cierta cuáles son las partículas que en los vidrios ejecutan las transiciones túnel. Esta ambigua situación nos motivó a dedicar atención al estudio de centros túnel creados artificial-

mente en cristales, con el objetivo ulterior de esclarecer el problema de los vidrios. El cristal estudiado en el trabajo con este propósito, como ya dijimos, es el Cuarzo sometido a la acción controlada de rayos gamma y de neutrones rápidos.

Es un hecho conocido desde hace años, que los neutrones rápidos de un reactor nuclear producen el desordenamiento progresivo de la estructura cristalina del Cuarzo hasta que, a altas dosis de esta penetrante radiación, todo el material se convierte en un vidrio de Sílice un poco más denso que lo normal. El desorden estructural se produce por un efecto de cascada, en el cual los átomos primariamente desplazados por los neutrones producen, a su vez, otros desplazamientos atómicos y así sucesivamente, hasta que la destrucción total de la periodicidad de la red cristalina da origen a un sólido amorfo.

En contraste, la radiación gamma del Cobalto-60 no modifica la red cristalina del Cuarzo de manera substancial, apenas sí produce la ionización de algunos átomos y la difusión de algunas trazas de impurezas, generalmente cercanas a iones de Aluminio que también en muy pequeña concentración, están siempre presentes en el Cuarzo en substitución del Silicio.

Sin entrar en mayores detalles técnicos sobre esta parte de las investigaciones en cristales desordenados, me voy a permitir resumir algunos hallazgos de cierta relevancia.

- En el Cuarzo irradiado con neutrones, aún a las bajas dosis del reactor de Los Altos de Pipe, es posible crear los centros túnel característicos de los vidrios de Sílice. Desafortunadamente, la identificación microscópica de estos centros túnel en el material irradiado ha resultado tan difícil como en los vidrios ordinarios. La posible causa de esta dificultad, es la temprana vitrificación local de la red cristalina por la acción de los neutrones rápidos.
- En el caso del cuarzo irradiado con rayos gamma o *Cuarzo Ahumado*, como también se le conoce por el color oscuro que adquiere, sí ha sido posible identificar la naturaleza microscópica de los centros túnel inducidos por la radiación ionizante. Se trata de un hueco, es decir, de la ausencia de un electrón, localizado en uno de los oxígenos vecinos a un ion de Aluminio. Este hueco realiza transiciones túnel entre dos de los cuatro oxígenos ligados al Aluminio. Estos centros túnel del Cuarzo ahumado, son de naturaleza electrónica y no estructural como en los vidrios o como en el Cuarzo irradiado con neutrones.

Con este breve resumen ponemos término a nuestra referencia al trabajo de incorporación. Me hubiese complacido concluir la exposición anunciando que, gracias a las numerosas y extensas investigaciones de tantos laboratorios del mundo, disponemos ahora de ideas más claras acerca del problema del origen microscópico de los centros túnel de los vidrios estructurales. Pero esto aún no es así; sólo podemos decir, para finalizar, que nos queda planteado este interesante reto científico y la expectativa de que los diferentes enfoques del problema que se ensayan actualmente, planteen nuevas ideas y direcciones de investigación y con un poco de suerte, nos ofrezcan nuevas sorpresas.

MUCHAS GRACIAS...