

página 1

blanca

Dr. Juan Ramón de la Fuente
Rector

Lic. Enrique del Val Blanco
Secretario General

Mtro. Daniel Barrera Pérez
Secretario Administrativo

Dra. Arcelia Quintana Adriano
Abogada General

Dr. René Drucker Colín
Coordinador de la Investigación Científica

Universidad Nacional Autónoma de México

Forjadores de la ciencia en la UNAM

Alfonso Mondragón Ballesteros

Instituto de Física

Dr. René Drucker Colín
Coordinador de la Investigación Científica

Ing. Jorge Gil Mendieta
Secretario Académico

Dr. Raúl Herrera Becerra
Secretario de Investigación y Desarrollo

Lic. Marcela Mendoza Figueroa
Secretaria Jurídica

Sra. Alicia Mondragón Hurtado
Secretaria Administrativa

Coordinación de la Investigación Científica

Forjadores de la ciencia en la UNAM

Ciclo de conferencias «Mi vida en la ciencia»

Junio 24 de 2003

Alfonso Mondragón Ballesteros

Instituto de Física

Vocación y amor al trabajo

Myriam Mondragón Ceballos

Instituto de Física

Alfonso Mondragón Ballesteros: Semblanza

México, 2003



Coordinación de la Investigación Científica
Universidad Nacional Autónoma de México

Eminentes investigadores del Subsistema de la Investigación Científica que el 25 de abril de 2003 recibieron de manos del Rector, doctor Juan Ramón de la Fuente, el reconocimiento «Forjadores de la ciencia en la UNAM» participan en el ciclo de conferencias «Mi vida en la ciencia», que tiene lugar en la Sala del Consejo Técnico de la Investigación Científica. Estos cuadernillos recogen las conferencias preparadas por estos investigadores y las semblanzas que sobre ellos han aportado otros científicos.

D.R. © 2003, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Coordinación de la Investigación Científica,
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F.
<http://www.cic-ctic.unam.mx>

ISBN (colección): 970-32-0849-5
ISBN (volumen): 970-32-0835-5

Impreso y hecho en México

Vocación y amor al trabajo

Alfonso Mondragón Ballesteros

Instituto de Física

La presea “Forjadores de la ciencia en la UNAM” es un alto honor que recibo agradecido. Se me otorga por lo que ya es, en sí mismo, un privilegio: el haber participado en los esfuerzos para poner en marcha y desarrollar la investigación científica en Física en forma sistemática y profesional en nuestra Universidad, y, por ende, en el país. Los muchos científicos mexicanos que ahora están activos en este campo, en y fuera de nuestra Universidad, y la alta calidad de su trabajo publicado, son un fiel testimonio del adelanto logrado en este empeño durante el último medio siglo. Junto con mis colegas he participado en los esfuerzos que han llevado a la formación de una tradición científica de Física en México, cuya importancia, espero, será gradualmente reconocida en círculos cada vez más amplios.

Los organizadores de esta celebración, amablemente, me han pedido que hable sobre la formación de mi vocación y sobre algunos aspectos de mi carrera científica en la Universidad, lo cual haré con mucho gusto. Pero, como además me han sugerido que lo haga en tal forma que “incite a los jóvenes a seguir una vocación científica”, no voy a hacer un catálogo de todos mis trabajos y afanes científicos pues, además de largo, sería muy aburrido, ni trataré de hacer un juicio sobre el valor del fruto de mi trabajo, pues creo que no soy yo quien deba hacerlo. Más bien, trataré de mostrar, mediante algunos ejemplos, cómo he hecho mi trabajo y cuáles han sido algunas de las muy gratas satisfacciones que me ha dado.

1. Cómo se formó mi vocación científica

En realidad no se cómo se formó mi vocación científica, pero puedo decir que soy curioso desde que nací. Siempre quise saber no sólo cómo son las cosas sino también por qué son así. También recuerdo algunas circunstancias que influyeron en el rumbo que tomó mi vida.

Mi padre, el doctor Joaquín Mondragón Forgues, era médico cirujano, egresado de la Facultad de Medicina de nuestra universidad. Después de unos pocos años de práctica médica había vuelto a los estudios y había hecho un posgrado y una residencia médica en el hospital de la Universidad Johns Hopkins en Baltimore entre 1928 y 1929. Volvió a Toluca y se casó con mi madre, Rebeca Ballesteros Garibay, quien había recibido una educación humanista muy esmerada y era una ávida lectora de novelas y libros de viajes y aventuras. Mi padre, además de ser un excelente médico y cirujano, era un hombre inteligente, culto y educado que sentía respeto y admiración por la ciencia. Tenía una excelente biblioteca, con muchos libros, no sólo de su especialidad sino también de ciencia, filosofía y literatura. Así que, desde que nací, el 14 de marzo de 1932, me encontré en un ambiente familiar de amor a la ciencia y la cultura. El gusto por la lectura y el amor a la ciencia los aprendí en casa.

Cursé los estudios primarios en escuelas públicas con muy buenas calificaciones pero con un éxito menos que mediano en los deportes.

En febrero de 1945 ingresé al Instituto Científico y Literario Autónomo de Toluca, en donde cursé los cinco años del programa de la Preparatoria Integral. El director de la escuela era el licenciado Adolfo López Mateos, hombre muy culto e inteligente que renovó los programas de estudios, quitó el énfasis en los estudios de los idiomas clásicos, griego y latín, y dio un gran impulso a la enseñanza de las ciencias.

En febrero de ese año, don Manuel Sandoval Vallarta, invitado por el licenciado López Mateos, fue al Instituto y dio una conferencia sobre la radiación cósmica y el pequeño observatorio que para medirla había sido instalado muy cerca de la cumbre del Nevado de Toluca. La plática de don Manuel me mostró a la investigación científica como algo vivo y actuante y no sólo como una experiencia libresca sobre un acontecer lejano en el tiempo y en el espacio. En esa conferencia había tenido ante mí y había escuchado a un distinguido señor, apenas unos pocos años mayor que mi padre, que había formulado una importante teoría y, con base en ella, había propuesto un experimento crucial para determinar la naturaleza de los rayos cósmicos. El experimento se había realizado en la Ciudad de México y don Manuel había estudiado en la Preparatoria Nacional. La charla de don Manuel me convenció de que estudiar Física y llegar a ser un investigador científico era una posibilidad real que estaba a mi alcance.

Cuando le dije a mi papá que quería ser físico y dedicarme a la investigación científica, no me desanimó, pero sí me advirtió que en México no había más

posibilidad entonces que la de hacer una carrera docente y que los profesores de Física estaban muy mal pagados. Sin embargo, me dio algunos excelentes libros de divulgación científica sobre la entonces nueva mecánica cuántica, sobre relatividad y sobre Matemáticas modernas, que yo leí ávidamente.

Yo era todavía muy joven y mi vocación aún no estaba decidida, pues durante aquellos primeros años de la escuela preparatoria, en diversas ocasiones, había considerado seriamente las posibilidades de ser médico, biólogo, filósofo, pintor, físico, matemático y varias otras. Mi amor por las Matemáticas y mi interés por la Física fue despertando gradualmente, gracias, en parte, a los excelentes libros que me dio mi padre y, sin duda alguna, gracias también a los excelentes cursos de Física y Matemáticas que se daban en el Instituto Científico y Literario de Toluca. Mis profesores de Matemáticas fueron don Marcelino Suárez, don Luis Gutiérrez y el arquitecto Víctor Manuel Villegas, de quienes aprendí los elementos de álgebra, geometría descriptiva y analítica, y el cálculo diferencial e integral. Mis profesores de Física fueron don Carlos Vélez y el ingeniero José Yurrieta. Los cursos del profesor Vélez eran muy completos y muy sólidos pero el programa y el texto que seguía eran un poco anticuados. En cambio, José Yurrieta, quien entonces era un joven pasante de Ingeniería, nos hablaba de algunos de los adelantos más recientes de la física moderna y nos llenaba de entusiasmo.

Al llegar al cuarto año de preparatoria debíamos optar por el bachillerato de ciencias o el de humanidades. En caso de escoger ciencias, todavía había que elegir entre las materias orientadas hacia la biología y la medicina o las materias de física y matemáticas, orientadas hacia las diversas ramas de la ingeniería y la química. No habiendo llegado todavía a ninguna decisión, me inscribí en los dos bachilleratos y dos años más tarde recibí dos diplomas.

No obstante que no había llegado a una decisión, fue entonces cuando me volví a plantear la posibilidad de estudiar física y dedicarme a la investigación científica. Cuando le pedí consejo a mi padre sobre ésta, para mí, difícil decisión, me envió a la Ciudad de México a hablar con don Carlos Graef Fernández, a quien él conocía. Don Carlos no solamente me convenció de que estudiar física era una gran idea, sino que también me convenció de la conveniencia de estudiar la licenciatura en México; específicamente, en la Facultad de Ciencias, y me ofreció ayuda para después hacer un doctorado en el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), en donde don Manuel Sandoval Vallarta había sido profesor y él había obtenido su doctorado. Volví contento a Toluca con un programa de estudios planteado en una forma clara y realista,

que convenció a mi padre. Sin embargo, pensando, sin duda, en las difíciles circunstancias económicas de los profesores en la época y de la casi total ausencia de programas institucionales de investigación científica, me recomendó que, al terminar el bachillerato, me inscribiera en dos carreras afines, que podrían ser la de físico y alguna de las ingenierías.

Siguiendo el consejo de mi padre, en 1950 me inscribí en dos carreras afines, que inicialmente fueron Ingeniería Química y Matemáticas. No resultaba difícil asistir a clases y cumplir bien con las tareas escolares, pues, durante los dos primeros años, las dos carreras tenían muchas materias en común. Además, la excelente preparación en matemáticas que había recibido en la preparatoria de Toluca me permitía tomar los cursos sin demasiado apuro y me daba tiempo para conocer otras escuelas y asomarme a otros estudios.

Durante mis primeros dos años en la Facultad de Ciencias conocí a mucha gente interesante. Además de los cursos normales del primer año, asistí, como oyente, al curso-seminario de Álgebra Abstracta, que presidían Félix Recillas y Salomón Lefschetz, y al que asistían como alumnos regulares Emilio Lluis y Humberto Cárdenas. También fui a saludar a don Manuel Sandoval Vallarta, quien me invitó a asistir al seminario de física que él presidía en la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, en las calles de Puente de Alvarado. Allí tuve la oportunidad de conocer a don Manuel y al grupo de, entonces, muy jóvenes físicos que se reunían con él. Entre ellos estaban Alejandro Medina, Marcos Moshinsky, Enrique Prieto, Juan de Oyarzábal, Francisco Medina y Juan Manuel Lozano; a varios de ellos también los veía y los trataba en la Facultad de Ciencias.

Un año más tarde cambié de Matemáticas a Física y abandoné la Ingeniería Química.

2. Los inicios de la investigación en Física de Partículas en el IFUNAM

Si bien la Facultad de Ciencias y el Instituto de Física habían estado funcionando continuamente desde 1938, cuando me inscribí en la Universidad como estudiante de la licenciatura, en 1950, los recursos materiales para la enseñanza y la investigación en Física como una ciencia básica, es decir, no como una materia al servicio de las ingenierías Civil, Mecánica, Eléctrica y Química, eran tan pocos y tan escasos que se puede decir, sin exagerar, que eran casi inexistentes.

Los muy pocos estudiantes de Física que había se reunían con sus profesores en un salón de clases grande en la planta baja del hermoso Palacio de Minería, donde estaba la Escuela de Ingeniería. También podíamos usar un cuartito en la azotea del mismo edificio, que antes había sido cuarto de escobas del personal de limpieza.

Las oficinas y la biblioteca del Instituto de Física estaban en un cuarto grande del primer piso del Palacio de Minería. Tenía seis escritorios, uno para el director, que era Carlos Graef Fernández, uno para su secretaria y uno para cada uno de los cuatro investigadores que tenían escritorio. Pero los resultados de más de una década de esfuerzos formativos ya se notaban. Había un grupo pequeño de brillantes jóvenes físicos que se habían graduado recientemente en la Facultad de Ciencias y ahora estaban muy activos enseñando e iniciando nuevos proyectos de investigación. Marcos Moshinsky había vuelto de la Universidad de Princeton y había empezado a dar cursos avanzados de Física; también inició un muy activo programa de investigación de Física Nuclear Teórica. Fue el ejemplo vivo de Marcos Moshinsky lo que nos inspiraba y nos animaba a trabajar muy duro. Así, aun cuando los recursos materiales fuesen escasos, en el Instituto de Física la actividad intelectual era intensa y además de vez en cuando venían algunos visitantes del extranjero muy interesantes. Aún recuerdo con gusto cuando conocí a Richard Feynmann, en 1951. Paraba en la Ciudad de México, por unos días, camino a, o proveniente de, Brasil y había venido al Instituto a saludar a Carlos Graef. Habían sido compañeros de estudios en el Instituto Tecnológico de Massachussets y Feynmann había escrito su primer artículo de investigación con Manuel Sandoval Vallarta sobre el efecto del campo magnético intergaláctico en la radiación cósmica. Cuando Feynmann llegó, Graef no estaba en el Instituto, así que la secretaria me pidió que me ocupara del visitante quien, según dijo, era un científico norteamericano que quería tomar una taza de café fuerte. Lo llevé al Café París, que se encontraba a la vuelta de la esquina, en donde tomamos dos tazas de café express y tuve el raro privilegio de que Feynmann mismo me explicara las gráficas de Feynmann.

En 1953, el Instituto de Física y la Facultad de Ciencias fueron las primeras dependencias que se cambiaron a los hermosos edificios nuevos de la Ciudad Universitaria. En el mismo año, el presidente, Adolfo Ruiz Cortines, inauguró los laboratorios de Física Atómica y Molecular, Rayos X y Cristalografía, Estado Sólido, Gravitación y Radiación Cósmica. El Laboratorio de Física Nuclear estaba equipado con un acelerador Van de Graaff de 5 Megae-

lectrón Voltios, con el cual un grupo pequeño de investigadores encabezado por Marcos Mazari inició un activo programa de investigación en colisiones y reacciones nucleares de baja energía. Este esfuerzo inicial en la Física Nuclear experimental se realizó en colaboración con el grupo del Instituto Tecnológico de Massachussets encabezado por el profesor William Buechner.

En aquellos años, la investigación en Física Teórica se hacía principalmente en el Instituto de Física de la UNAM, pero algunos de sus miembros más jóvenes, que eran investigadores activos, recibían un sobresueldo del Instituto Nacional de la Investigación Científica (INIC). Esta ayuda económica estaba condicionada sólo a la publicación de artículos de investigación en revistas de circulación internacional arbitradas y a la participación en la reunión semanal del Seminario de Física, organizado y presidido por Manuel Sandoval Vallarta, en el que se leían y discutían casi todos los trabajos de investigación en física antes de su publicación. Fue en el INIC que Alejandro Medina, quien no era miembro del Instituto de Física, dio algunos cursos de Electrodinámica Clásica y Cuántica. También organizó un seminario de investigación sobre Física de las Partículas Elementales y Teoría del Campo. Los participantes eran algunos de los físicos más jóvenes del Instituto de Física y algunos de los estudiantes de Física más adelantados; entre ellos estaban Juan de Oyarzábal, Fernando Prieto, Francisco Medina, Juan Manuel Lozano y yo. Muy pronto, este grupito produjo algunos resultados: “On the field of the Bhabha equation” por F. E. Prieto^{1,2}, “Pion-pair production” por J. de Oyarzábal³ y “Divergencies in Quantum Field Theory” por A. Medina⁴, que fueron presentados en la Asamblea Conjunta de las Sociedades Mexicana de Física y The American Physical Society en la Ciudad de México en agosto de 1955.

En esa reunión se leyeron dieciséis contribuciones de autores mexicanos, entre las cuales estaba mi primer trabajo de investigación sobre “Scattering length and effective range for velocity dependent tensor forces in nucleon-nucleon collisions”⁵, que contenía los resultados de mi tesis de licenciatura, que había escrito bajo la supervisión y con la ayuda de Marcos Moshinsky.

Fue bajo la dirección de A. Medina que F. E. Prieto escribió la disertación sobre “Secciones diferencial y total de la dispersión nucleón-antinucleón”, que presentó como tesis en la Facultad de Ciencias para obtener el grado de doctor en Ciencias, en 1956. Los resultados principales de este trabajo se publicaron en *Physical Review*⁶, en 1957. Ésta fue la primera tesis doctoral escrita en México sobre aspectos teóricos de la Física de las Partículas Elemen-

tales. Un poco después, Prieto publicó un artículo sobre la no-conservación de la paridad en la desintegración de los hiperones⁷.

En ese mismo año, 1956, Moshinsky había organizado la Primera Escuela de Verano Mexicana de Física, que posteriormente se convirtió en la Escuela de Verano Latinoamericana de Física, en la que conocí al profesor R.E. Peierls. Otros de los profesores eran Joseph Levinger, Bertold Stech, Robert G. Thomas y Marcos Moshinsky. A esta primera escuela de verano de física asistieron varios estudiantes mexicanos y algunos estudiantes extranjeros. Entre los estudiantes extranjeros estaban Charles Summerfield y Sheldon Glashow, quien más adelante ganó el premio Nóbel por su trabajo sobre la Teoría del Campo de las Interacciones Electrodébiles; Martin Blume, quien más tarde sería un experto en Física del Estado Sólido en Brookhaven y André Martin, un joven físico francés alegre y amable que llegó a ser muy conocido por sus muchas contribuciones a la Teoría Cuántica del Campo. En colaboración con estos dos últimos, escribí y preparé la edición de las notas del curso de Peierls sobre Fuerzas Nucleares que publicó el Instituto de Física de la UNAM.

2.1 Inglaterra

En 1957, fui a la Universidad de Birmingham, en Inglaterra, como estudiante de doctorado. Allí tomé cursos de Teoría Cuántica del Campo con Sam F. Edwards, quien después sería sir Sam Edwards; de Física Nuclear con el profesor R.E. Peierls, quien sería sir Rudolf Peierls, y muchos otros distinguidos profesores. Después de dos años de trabajo duro, escribí una disertación sobre “El Principio de Pauli en el modelo óptico de las reacciones nucleares”; bajo la supervisión de Peierls, presenté el examen correspondiente y obtuve el doctorado.

2.2 Resonancias, partículas elementales y polos de Regge

Volví a México a finales de 1960 y me reincorporé al Instituto de Física en enero de 1961. El director del Instituto era también jefe de Cursos de Física de la Facultad de Ciencias. Para entonces, el número de alumnos de física había aumentado mucho pero no así el número de profesores de física con el grado de doctor, de modo que pronto me encontré con una carga docente bastante pesada. En un principio tenía que dar los cursos de Métodos Matemáticos de la Física y de Mecánica Clásica Avanzada, en la licenciatura, pero lue-

go tuve que dar también los cursos de Física Nuclear Teórica y Mecánica Estadística, en el doctorado que se estaba organizando. Así pues, al principio no pude encontrar fácilmente el camino de vuelta a la investigación. En 1963, Germinal Cocho volvió a México de la Universidad de Princeton, en donde había escrito una tesis sobre “Un modelo de resonancias en la aniquilación nucleón-antinucleón”⁸, bajo la dirección del profesor R. Blanckenbecler. Cocho conocía bien la teoría de la matriz S de las interacciones entre las partículas elementales propuesta por W. Heisenberg y desarrollada por G.F. Chew y varios otros. Parecía natural que tratáramos de combinar lo que yo había aprendido de Peierls acerca de la teoría de la matriz S de las reacciones nucleares con la teoría de la matriz S de las partículas elementales que él había aprendido de Blanckenbecler en Princeton. Pronto nos dimos cuenta de que el modelo óptico de la dispersión de un nucleón por un núcleo y el modelo de polos de Regge de las interacciones entre las partículas elementales a altas energías y valores pequeños del momento transferido tenían en común la siguiente propiedad: en ambos casos, la amplitud de la dispersión se descompone naturalmente en la suma de un término que es una función lisa de la energía y que describe la respuesta inmediata del sistema más términos con una rica estructura en la energía que se debe a la contribución de muchas resonancias estrechas y bien definidas y que describe la respuesta retardada del sistema. Esta analogía nos llevó, primero, a la definición del análogo no-relativista de la representación de Regge-Joos del canal cruzado que se usa en la física de las partículas a velocidades relativistas⁹. Definimos una descomposición de la amplitud de la dispersión en amplitudes parciales, cada una de las cuales corresponde al intercambio de un conjunto de pseudoestados que se transforman irreduciblemente bajo la acción del grupo de Galileo. Obtuvimos fórmulas explícitas para la dispersión elástica de partículas con valores arbitrarios del spin, tanto para la dispersión hacia adelante como para la que no ocurre hacia adelante, en las que los grupitos de estabilidad eran los grupos euclidianos en tres y en dos dimensiones, $E(3)$ y $E(2)$ ¹⁰. Aplicamos este formalismo a la dispersión de nucleones por partículas alfa y, parametrizando la amplitud de la dispersión con tan sólo dos multipolos efectivos, obtuvimos una muy buena representación de la sección transversal diferencial y de la polarización en un intervalo de energías de 66 a 320 MeV^{10,11}.

Animados por el éxito de la analogía encontrada, a finales de 1968 propusimos una formulación completamente relativista de las reacciones nucleares, en la cual la dinámica del proceso de interacción estaba parametriza-

do en términos del intercambio de representaciones de algún grupo de no-invariancia¹². Dos condiciones deberían cumplirse: Primera, la invariancia relativista del formalismo requería que el grupo de no-invariancia tuviese un subgrupo isomorfo al grupo de Lorentz. Segunda, puesto que el grupo unitario especial de tres dimensiones, $SU(3)$, que es el grupo de simetrías del oscilador armónico, había resultado tan útil y exitoso en la física nuclear de baja energía, el grupo de no-invariancia debía contener a $SU(3)$ como un subgrupo compacto. El grupo más simple que satisface estas condiciones es el grupo no-compacto $SU(3,1)$ que tiene la ventaja adicional de ser matemáticamente simple de manejar. Sin embargo, aun cuando muchas propiedades podían, en principio, ser calculadas, la descripción física de los procesos de colisión y reacciones entre núcleos y partículas elementales era algo abstracta, y las aplicaciones a procesos reales un poco limitadas.

El año siguiente, 1969, lo pasé en el Centro Internacional de Física Teórica, en Trieste, Italia, a donde Germinal Cocho acudía los meses de verano como miembro asociado. Primero solo y después con Germinal, continué trabajando en el proyecto que habíamos iniciado en México. Ahora dirigíamos nuestra atención a la aplicación de los conceptos e ideas de la física nuclear de baja energía a la interpretación de la descomposición de Regge-Joos de la amplitud de las colisiones hadrón-hadrón a altas energías y valores pequeños del momento transferido. En este modelo matemático de las interacciones entre partículas elementales, uno descompone la amplitud en una suma de términos, que son las contribuciones de los polos de Regge y el término restante o amplitud substraída, el cual está dado por la integral del fondo de Regge. Ya desde los primeros años de la década de 1960 se había logrado identificar a los polos de Regge con resonancias cuánticas, es decir, partículas que decaen espontáneamente. Las principales eran, el Pomerón, los mesones ρ, ω, \dots y los piones, π , los nucleones N y sus estados excitados N_1, N^*, \dots etc. También se habían buscado y encontrado las llamadas “recurrencias de Regge”, que son resonancias, es decir, partículas inestables que decaen, con valores del spin dos unidades más grandes que el spin de las resonancias originales, es decir una partícula ρ^* con spin igual a 3, y así sucesivamente. Se habían encontrado unas pocas recurrencias de los mesones y algunos candidatos a recurrencias del protón y la partícula Δ fueron identificados. En una representación gráfica de dos dimensiones en la que cada partícula se caracteriza por el valor de su spin y su masa, los polos de Regge son puntos que se mueven a lo largo de trayectorias cuando la energía de la partícula cambia.

Las trayectorias de las partículas y sus recurrencias tendían a quedar en líneas rectas paralelas. Estas trayectorias se usaron en los cálculos de la dispersión directa y de intercambio, para tratar de comprender cómo depende la sección eficaz de la dispersión del momento transferido durante la colisión o reacción entre los hadrones. Así pues, en principio, las trayectorias de Regge podrían utilizarse para comprender tanto los aspectos dispersivos de las colisiones como la producción de partículas elementales que decaen, es decir, la producción de resonancias, en los procesos de colisión y reacciones entre hadrones. En tanto que una gran mayoría de los físicos de partículas elementales enfocaban su atención a las propiedades de los polos de Regge, nosotros nos ocupamos de estudiar la integral del fondo. Logramos demostrar que el parámetro de integración en esa integral se puede entender como una variable que mide el retardo temporal¹³. A partir de este resultado, también pudimos demostrar que los modelos matemáticos de las colisiones entre partículas elementales con trayectorias de Regge lineales tienen una interpretación simple en la representación del retardo temporal, como procesos de dispersión múltiple de componentes puntuales y masivas de los hadrones. Obtuvimos este importante resultado el mismo año en que se publicó la primera evidencia experimental en favor de que los hadrones tuviesen una estructura “granular” y que los “gránulos”, inicialmente llamados partones y posteriormente identificados con los “quarks”, se comportarían como objetos puntuales, masivos, que se mueven casi libres en el interior del hadrón. Además, encontramos que, en una teoría de la dispersión por un pseudopotencial, las trayectorias lineales crecientes corresponden a un potencial que varía linealmente con la distancia r entre los quarks, es decir, a fuerzas independientes de la distancia entre las partículas fundamentales de que están compuestos los hadrones¹³.

En la década de 1970, la existencia de los quarks quedó firmemente establecida y se formuló la Cromodinámica Cuántica. Actualmente, esta teoría es universalmente aceptada como la teoría del campo correcta de las interacciones fuertes, y la teoría de la matriz de Heisenberg, Chew y Low ha sido olvidada. La atención de los investigadores se dirige ahora a la Cromodinámica Cuántica para buscar la explicación de las propiedades de los polos de Regge y su conexión con las propiedades de los hadrones. Sin embargo, aunque ya se han hecho grandes progresos en esta dirección, este problema aún no está cabalmente resuelto y todavía nos preguntamos, en términos de la Cromodinámica Cuántica, ¿qué es el Pomerón? o ¿cómo se calculan las propiedades de los hadrones como sistemas compuestos de quarks y gluones?

3. Investigación, enseñanza y otras cosas.

Siempre he considerado a la enseñanza como una de mis responsabilidades principales. La otra es la investigación científica. Nada encuentro tan satisfactorio y agradable como hacer mi propia investigación y sentir que así contribuyo al adelanto de mi propio campo. Igualmente, creo que enseñar es la obligación primaria de un profesor en la Universidad. El mejor modo, y el más práctico, de hacer de estas dos tareas una sola es hacer la propia investigación en colaboración con los estudiantes. Claro que, además de esto, hay que dar los cursos, obligación que siempre he cumplido con gusto, porque me ha permitido mantenerme al día en las materias que me interesan.

Mi primer estudiante de grado fue Carlos Ruiz Mejía, a quien, en 1964, le propuse un problema de conductividad térmica y centros F en el cloruro de sodio. Trabajar con Carlos fue fácil y agradable, pues era un estudiante inteligente y dedicado que escribía muy bien. Pronto terminó un excelente trabajo de tesis, que presentó en 1966 en la Facultad de Ciencias para obtener el grado de doctor.

También hicieron los estudios del doctorado bajo mi supervisión, en distintas épocas, Enriqueta Hernández, Juan Manuel Velásquez, Daniel Sepúlveda y Ezequiel Rodríguez. Todos ellos desarrollaron tesis sobre alguno de los problemas en los que yo mismo estaba trabajando.

Además supervisé los estudios del doctorado y dirigí las tesis doctorales de Silvia Bulbulián, Luz Alicia Fucugauchi y María de Nuria Segovia, quienes buscaron mi ayuda cuando ya habían iniciado un programa propio de investigación en el Centro Nuclear de Salazar del Instituto Nacional de la Investigación Nuclear.

Cada una de esas tesis fue el inicio de una amistad profunda y duradera que, en algunos casos, dio lugar a una colaboración profesional de mayor alcance.

Esto es especialmente cierto de Enriqueta Hernández, quien durante 1979 y 1980 escribió una tesis sobre la ecuación de Schrödinger del modelo óptico de las colisiones entre núcleos complejos. Esta tesis fue una continuación del trabajo que yo había desarrollado en mi propia tesis doctoral. Al terminar los estudios del doctorado en nuestra universidad, Enriqueta Hernández hizo una estancia posdoctoral en el Laboratorio de Física Nuclear de la Universidad de Oxford, en donde colaboró con el doctor Peter Hodgson, con quien continuó su trabajo sobre el potencial óptico de las reacciones nu-

cleares. A su vuelta a México, se incorporó al Instituto de Física, en donde trabaja y colabora conmigo hasta la fecha. Más adelante diré algo más acerca de los resultados de esta colaboración y del trabajo que hice con Ezequiel Rodríguez.

La dirección de las tesis del Centro Nuclear fue parte de una colaboración mucho más amplia que duró algo más de dieciséis años. Se inició en 1966, cuando Marcos Mazari me pidió que le ayudara, como asesor teórico, en la organización de la investigación en Física Nuclear en el Centro Nuclear de Salazar, cuya construcción se había iniciado en junio de 1964. Durante muchos años dediqué todos los viernes de cada semana a esa colaboración. Además de mis tareas de asesor, ayudé a Mazari en el cálculo y diseño de un analizador de polarización para reacciones nucleares iniciadas con protones y deuterones, el cual era, esencialmente, un electroimán de polo hendido de tipo Enge. Dicho instrumento fue calculado, construido y probado en Salazar. Funcionó muy bien pero, cuando renunció Mazari y su grupo de Física Nuclear se disolvió, en mayo de 1975, el analizador de tipo Enge fue abandonado. En el Centro Nuclear di cursos de Física Nuclear y de Reacciones Nucleares para el grupo de Mazari y cursos de Mecánica Cuántica y Métodos Matemáticos para las químicas nucleares.

Los temas del trabajo de Silvia Bulbulián y Luz Alicia Fucugauchi estaban algo lejos de mi propia especialidad y por esta razón busqué la ayuda de especialistas para esta tarea.

La tesis de la maestría (1970) y el doctorado (1976) de Silvia Bulbulián fueron dirigidas en colaboración con el profesor Alfred G. Maddock, jefe del Lensfield Laboratory de la Universidad de Cambridge. Al terminar esta labor, al cabo de casi once años de trabajo, la inteligencia, la disciplina y el tesón de Silvia le habían dado no solamente los grados de maestra y doctora en Ciencias, también le habían permitido formar, organizar y dirigir el mejor grupo de investigación de su especialidad, que entonces se llamaba “Hot Atom Chemistry”, en México.

Dirigí la tesis de Luz Alicia Fucugauchi en colaboración con el profesor Hans J. Ache, del Virginia Polytechnic Institute and State University. El trabajo versó sobre la aniquilación del positrón y el positronio en sistemas coloidales. Esta muy interesante colaboración permitió a Luz Alicia no sólo graduarse de doctora, sino también formar el primer grupo de investigación experimental de físico-química por aniquilación de positronio que hubo en México.

La tesis doctoral de María de Nuria Segovia trataba de los efectos de la radiación gamma y la temperatura en detectores de trazas nucleares hechos de vidrio (1983), tema que me permitió dirigir esta tesis en colaboración con Silvia Bulbulián.

4. Resonancias en el espectro de ${}^6\text{Li}$

4.1 Una buena noticia

En septiembre de 1999, junto con la versión preliminar de la nueva edición de las “Nuclear Tables”¹⁴, recibí una buena noticia y una grata satisfacción. En la sección dedicada a los núcleos constituidos por seis nucleones (${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$), noté que la región de alta energía del espectro del núcleo de ${}^6\text{Li}$ había sido cambiada y ya no se veían algunas feas discrepancias e inconsistencias que había en las ediciones de 1979, 1988 y anteriores. Ésta era una buena noticia, especialmente grata y satisfactoria para mí porque, según está explicado en las propias Tablas Nucleares y en la carta de Ron Tilley que venía con ellas, la correcta identificación de los estados excitados de paridad negativa en el espectro del núcleo de ${}^6\text{Li}$, así como los valores numéricos de los parámetros que los describen, habían sido tomados de nuestros trabajos¹⁵⁻¹⁷, que así pasaron de ser meras referencias bibliográficas en las Tablas Nucleares viejas¹⁸ a la categoría de valores oficiales de referencia en las nuevas Tablas Nucleares^{14,19}.

Quisiera compartir con ustedes el gusto de esta noticia y así darles una idea, aunque sea vaga, de lo que pasa desde el momento en que a uno se le ocurre una buena idea hasta el momento en que ésta ya se ha transformado en ciencia hecha, es reconocida y queda registrada como tal.

4.2 Resonancias nucleares y estados de Gamow

Conviene empezar recordando algunas nociones sobre radiactividad y resonancias nucleares. Todos sabemos que algunos elementos naturales pesados son radiactivos, como el Radio, que emite partículas alfa y se transforma en Polonio. También algunos elementos ligeros como el Berilio son inestables: después de un tiempo de haber sido formados se desintegran espontáneamente, emitiendo núcleos más pequeños, partículas materiales o radiación electromagnética, es decir, fotones.

En el laboratorio, este fenómeno se observa con facilidad en los núcleos de todos los elementos. En una colisión o reacción nuclear, dos núcleos que chocan se funden y forman un nuevo núcleo en un estado excitado que, como regla general, es inestable, dura un tiempo y luego se desintegra, emitiendo núcleos más ligeros, partículas ligeras y radiación. La dualidad partícula-onda de la mecánica cuántica asocia una onda al movimiento relativo de los fragmentos nucleares en una reacción de onda resonante que, inicialmente confinada en una región de dimensiones nucleares, se extiende a todo el espacio, como cuando se forma una resonancia en el interior de la cavidad de un instrumento musical, que se propaga luego hasta llegar a nuestros oídos. Debido a esta analogía, a las reacciones nucleares que ocurren mediante la formación de un estado intermedio que decae se les llama reacciones nucleares resonantes o simplemente resonancias nucleares.

El estudio de las resonancias nucleares da información sobre los estados excitados de los núcleos atómicos, es decir, sobre su espectro de energía, y de aquí se obtiene la información que nos permite comprender la estructura y dinámica nucleares.

Las ondas resonantes asociadas a la desintegración radiactiva y las reacciones nucleares se llaman también estados de Gamow, en honor del célebre físico ruso George Gamow, quien usó este concepto en 1928 para explicar la radiactividad alfa del Radio y otros elementos pesados.

La idea de usar los estados de Gamow para describir las resonancias que ocurren en las reacciones nucleares se debe originalmente a R. E. Peierls^{20,21}, quien hizo notar que, de este modo, cada estado del espectro de un núcleo atómico queda asociado, de modo simple y natural, a un conjunto de números cuánticos bien definidos: energía cuantizada, momento angular total o spin, isospin, carga eléctrica, paridad, etc., independientemente de que el estado sea estable o sea una resonancia, es decir, un estado inestable que decae espontáneamente. Si esta excelente idea no se había llevado a la práctica era porque los estados de Gamow, debido a su naturaleza matemática peculiar, requerían de métodos matemáticos especiales, que no eran del conocimiento común de los físicos en aquellos años. En 1982, en colaboración con Enriqueta Hernández, inicié una investigación sistemática de las propiedades de los estados de Gamow y sus aplicaciones en la teoría de las reacciones nucleares y en otros campos. Consultamos con Peierls, por carta, quien nos alentó a seguir y nos hizo algunas sugerencias. Al siguiente año, en 1983, ya habíamos logrado dos avances importantes.

En 1983 habíamos logrado dos adelantos importantes en el estudio de las resonancias nucleares y su descripción mediante las funciones de Gamow. Por medio de la teoría de las ecuaciones integrales lineales de Fredholm, demostramos que es posible describir las ondas resonantes en términos de los momentos cinéticos de las partículas que participan en la reacción²², en vez de la descripción usual, en términos de las posiciones relativas. Esta nueva descripción es ventajosa, porque evita algunas dificultades matemáticas que impedían la aceptación del uso de los estados de Gamow como una herramienta de cálculo normal.

El mismo método nos permitió definir las autofunciones de Gamow que describen la formación de resonancias producidas por fuerzas no-locales sobrepuestas a las fuerzas de repulsión electrostáticas, que es el caso de la colisión de sistemas complejos, como los núcleos formados por muchos nucleones²³.

Estos resultados nos permitían formular la teoría de las reacciones nucleares resonantes en una forma que es, en principio, simple y exacta, y está libre de aproximaciones y simplificaciones innecesarias²⁴.

El siguiente paso fue el estudio de la reacción nuclear de captura radiactiva de un núcleo de 3 Helio (^3He) por un núcleo de 3 Hidrógeno (^3H), también conocido como Tritio, para formar un núcleo de 6 Litio (^6Li).

En esta reacción nuclear, los núcleos de ^3He y ^3H se aproximan uno al otro con una velocidad que inicialmente es muy grande pero disminuye gradualmente, por efecto de la repulsión electrostática de las cargas eléctricas de los núcleos. Cuando los dos núcleos están muy cerca uno del otro, se deja sentir el efecto de la poderosa fuerza nuclear atractiva, que es de muy corto alcance, pero mucho más intensa que la fuerza eléctrica repulsiva, y se forman uno de varios estados altamente excitados del núcleo de ^6Li que se manifiestan como resonancias de vida media muy corta. Una vez formado, el ^6Li en el estado resonante puede decaer de dos maneras:

I). En la gran mayoría de los casos, el núcleo de ^6Li muy excitado se rompe en dos fragmentos iguales a los que formaron la resonancia, es decir, un ^3He y un ^3H , que se alejan uno del otro a gran velocidad. Cuando esto ocurre, se dice que se ha producido una resonancia en una colisión elástica.

II). Algunas pocas veces el núcleo de ^6Li en el estado resonante no se rompe, sino que emite un fotón (rayo gamma) que se lleva la energía y el momento angular excedentes y queda un ^6Li en un estado muy poco excitado, el cual, después de un tiempo, emite otro fotón y decae al estado basal de ^6Li . En

estos casos, decimos que ha ocurrido una reacción nuclear de captura radiactiva de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$ para formar ${}^6\text{Li}$.

4.3 La captura radiativa de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$

La captura radiactiva de ${}^3\text{He}$ por Tritio había sido medida a baja energía E_{H_e} ($1 \text{ MeV} \leq E_{H_e} \leq 5 \text{ MeV}$) por S. L. Blatt y sus colaboradores²⁵ en el Departamento de Física de la Universidad del Estado de Ohio y por el grupo del profesor W. F. Meyerhoff²⁶ en el laboratorio de Física Nuclear de la Universidad de Stanford, California, a energías más altas ($6 \text{ MeV} \leq E_{H_e} \leq 26 \text{ MeV}$). En estos experimentos se hicieron medidas simultáneas tanto de los fotones emitidos en la captura radiactiva como de los proyectiles de ${}^3\text{He}$ dispersados por el blanco de Tritio (${}^3\text{H}$) en las colisiones elásticas.

La dispersión elástica de un haz polarizado de ${}^3\text{He}$ por un blanco de Tritio (${}^3\text{H}$) había sido cuidadosamente medida en el Laboratorio de Física Nuclear de la Universidad de Birmingham, en Inglaterra, por el profesor J. B. A. England y sus colaboradores²⁷. En una serie de elegantes experimentos, estos investigadores midieron las polarizaciones y las distribuciones de las secciones eficaces como funciones de las energías y de los ángulos de salida de los proyectiles de ${}^3\text{He}$ y los núcleos de retroceso de Tritio para energías del haz incidente en el intervalo de energías $5 \text{ MeV} \leq E_{H_e} \leq 30 \text{ MeV}$.

Los análisis de los datos experimentales, hechos por los autores de los experimentos y reportados en las ediciones de 1979 y 1988 de "Nuclear Tables"¹⁸, mostraban claras inconsistencias y contradicciones entre la información derivada de la dispersión elástica y la información obtenida de la captura radiactiva.

Estas inconsistencias no se debían a errores en los experimentos, sino que, como ocurre con frecuencia, la teoría se había rezagado respecto de los experimentos. Nuestros colegas norteamericanos habían usado una forma simplificada de la teoría de la captura radiactiva²⁸ que no podía exhibir, en forma explícita, la formación y decaimiento de las resonancias y que no tomaba en cuenta las fuerzas no-centrales que actúan entre los núcleos de ${}^3\text{He}$ y ${}^3\text{H}$. Los ingleses habían hecho el análisis de la dispersión elástica sin tomar en cuenta que, cuando se forma una resonancia, el número de núcleos de ${}^3\text{He}$ que salen de rebote de las colisiones elásticas es menor que el número de ellos que da en el blanco de Tritio, porque algunos de los estado resonantes de ${}^6\text{Li}$ que se forman en la colisión decaen emitiendo un fotón y quedan en el blanco como núcleos de ${}^6\text{Li}$.²⁷

Aquí teníamos un buen problema para poner a prueba nuestros resultados sobre resonancias y estados resonantes.

4.4 La resonancia dipolar gigante en ${}^6\text{Li}$

La reacción inversa de la captura radiactiva de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$ es la fotodesintegración de ${}^6\text{Li}$, en la que un núcleo de ${}^6\text{Li}$ absorbe un fotón (un rayo gamma) y se rompe en un ${}^3\text{He}$ y un ${}^3\text{H}$.

Las características más notables de las reacciones nucleares en las que un núcleo absorbe un fotón es la excitación de una resonancia gigante. En los núcleos medianos y pesados, ésta se encuentra a una energía de excitación que va de 13 MeV para los núcleos pesados hasta 18 MeV para los núcleos medianos.

En los núcleos ligeros se presenta un cuadro completamente distinto, la resonancia gigante se fragmenta en varias resonancias muy anchas que se superponen y se distribuyen en una amplia región de energía de excitación que puede llegar hasta 35 o 40 MeV.

Blatt y sus colaboradores²⁵ habían medido la fotodesintegración de ${}^6\text{Li}$ a baja energía y habían notado una resonancia (un máximo en la sección eficaz *vs.* energía) cuya energía correspondía a la energía de excitación de la primera resonancia observada en la captura radiactiva de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$.

Así pues, era razonable suponer que las anchas resonancias observadas en la dispersión elástica y en la captura radiactiva de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$ no fueran otra cosa que las componentes de la resonancia dipolar gigante del núcleo de ${}^6\text{Li}$.

Para empezar, decidimos reformular la teoría de la resonancia dipolar gigante en la dispersión elástica y la captura radiactiva directa de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$ para formar ${}^6\text{Li}$ con ayuda de nuestros resultados previos sobre los estados de Gamow. Esto nos permitió escribir la teoría en una forma simple y exacta, en la que se exhibía, de manera explícita, la fragmentación de la resonancia dipolar gigante en una suma de cuatro resonancias anchas, cada una de ellas caracterizada por los números cuánticos de un estado excitado de ${}^6\text{Li}$ ²⁴. Una vez que la teoría quedó en esa forma, hicimos un nuevo análisis de toda la información disponible sobre la dispersión elástica de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$. Después de un largo y laborioso cálculo, obtuvimos las energías, semianchuras (vidas medias) y los números cuánticos de todos los estados excitados de ${}^6\text{Li}$ de paridad negativa y energía de excitación por arriba de 15.795 MeV hasta 35 MeV. Además de corregir los valores previamente reportados por otros autores, logramos identificar un nivel de energía hasta entonces no conocido, que se en-

cuenta a una energía de $E_{L_i} = 26.59$ MeV con $J^\pi = 2^-$ y $S = 1$, $T = 1$ correspondiente a una nueva resonancia muy ancha que no había sido reportada previamente.

Finalmente, una vez conocidos los parámetros de todas las resonancias elásticas, el análisis de la captura radiactiva se pudo hacer sin mayor problema, aunque no sin otro largo y laborioso cálculo numérico. La identificación del nivel excitado de ${}^6\text{Li}$ a $E_{L_i} = 26.59$ MeV y la resonancia correspondiente nos permitieron explicar sin dificultad las características de la captura radiactiva observada experimentalmente como debidas a la interferencia de los fotones provenientes de dos resonancias que se superponen (se mezclan) de manera coherente¹⁵⁻¹⁷.

Fue así como la información obtenida de los datos provenientes de la dispersión elástica y la información de la captura radiactiva se complementaron para producir una descripción armoniosa y libre de contradicciones de la región de alta energía del espectro de ${}^6\text{Li}$.

Un subproducto importante del análisis fue la identificación del mecanismo dinámico responsable de la captura radiactiva y la formación de resonancias en la dispersión elástica de ${}^3\text{He}$ por ${}^3\text{H}$. A saber, la excitación de la resonancia dipolar gigante en el núcleo de ${}^6\text{Li}$, que así resultó ser el núcleo más pequeño, formado por sólo seis nucleones, en el que este modo colectivo se manifiesta.

4.5 Confirmación de los resultados

Los resultados principales de nuestro trabajo sobre el espectro de ${}^6\text{Li}$ fueron confirmados por varios autores. Los primeros que se ocuparon de nuestro trabajo fueron V. G. Neudatchin, V. I. Kukulín, V. N. Pomerantsev y A. A. Sakharuk²⁹ del Laboratorio de Física Nuclear Teórica de la Universidad Estatal Lomonosov de Moscú, quienes hicieron notar, en 1992, que nuestros resultados ponían orden y concierto en la región de alta energía del espectro de ${}^6\text{Li}$. En 1995, H. Ohkura, T. Yamada y K. Ikeda³⁰ de las universidades de Yokohama y Niigata, en Japón, retomaron la idea de usar autoestados de Gamow en un cálculo microscópico del espectro de ${}^6\text{Li}$. Hicieron el cálculo con el llamado modelo de cúmulos nucleares. Obtuvieron valores de las energías de excitación y las semianchuras (vidas medias) de los estados de paridad negativa de ${}^6\text{Li}$ que discrepaban de los valores que aparecían en las Tablas Nucleares de 1988 y que coincidían bien con los valores que nosotros habíamos obtenido en

1990. En consecuencia recomendaron que se adoptaran nuestros valores en la siguiente edición de las Tablas Nucleares. Unos años más tarde, S. B. Dubovichenko y A. V. Dzhezairov-Kakhramanov³¹, de la Universidad del Estado de Kazajstán, hicieron un nuevo cálculo de la captura radiactiva de ^3He por ^3H para formar ^6Li en los estados excitados de paridad negativa. Usaron un modelo de dos cúmulos nucleares y un potencial entre cúmulos que toma en cuenta el efecto del principio de exclusión de Pauli. Hicieron el cálculo para energías de excitación de ^6Li menores de 40 MeV hasta las energías más bajas de interés astrofísico, $E_{H_e} \sim 0.1$ MeV. Sus cálculos reprodujeron nuestros resultados.

Finalmente, el grupo encargado de la nueva edición de las Tablas Nucleares (septiembre de 2002), Triangle Universities Nuclear Laboratory: Nuclear Data Evaluation Project, seleccionó los resultados de nuestro trabajo como valores oficiales de referencia y en esa calidad han sido publicados en la nueva edición de “Nuclear Tables: Energy Levels of Light Nuclei $A = 5,6,7$ ”, D. R. Tilley, C. D. Cheves, J. L. Godwing, G. M. Hale, H. H. Hofmann, J. H. Kelley & S. L. Godwin, Nuclear Physics A 708 (1-2), 3-163 (2002) (ver páginas 50, 52, 53 y 82).

5. Dobletes, degeneración y fases topológicas de los estados resonantes

Ya he dicho antes que el término estado resonante o resonancias cuánticas se aplica a los estados internos inestables de los sistemas cuánticos autoconfinados, como los núcleos atómicos y las partículas elementales, que tienen una energía interna bien definida y que decaen o se desintegran con una vida media también definida. Dado que la energía emitida o absorbida por un sistema cuántico es proporcional a una frecuencia bien definida, la analogía de las resonancias cuánticas con las resonancias acústicas o eléctricas es evidente. Una misma flauta, con la misma “pisada” o digitación, emite siempre la misma nota.

¿Qué ocurre si hacemos sonar una flauta doble, es decir, una flauta con dos tubos iguales y un solo pico? Produce un sonido que es la mezcla de dos notas con frecuencias y vidas medias casi iguales. Si en vez de hablar de una flauta doble, se tratara de un núcleo atómico, diríamos que su espectro de energías tiene un doblete de estados resonantes coherentes (con todos los números

cuánticos iguales). Ahora bien, si la flauta doble emitiera dos notas puras con idénticas frecuencias y vidas medias diríamos que los dos tubos cantan al unísono y están bien entonados. En este caso, si se tratara de un núcleo atómico, diríamos que su espectro de energía tiene un doblete de estados resonantes degenerado.

La flauta doble se puede entonar porque tiene algunos parámetros de control que nosotros podemos modificar a voluntad. Para entonar la flauta doble podemos cambiar un poco la longitud y la forma de los tubos o bien la forma en que éstos se acoplan al pico. En el caso de las resonancias moleculares, atómicas o nucleares, también podemos actuar sobre el sistema modificando a voluntad algunos parámetros de control externos que actúan sobre las componentes del sistema. Éstos pueden ser campos electromagnéticos o nucleares externos muy intensos, como ocurre en los bien conocidos efectos de Zeeman y Stark, o bien, se pueden cambiar los parámetros que regulan la estructura e interacciones internas del sistema, como las masas de sus componentes o la altura y anchura de los potenciales que regulan el movimiento interno de esas componentes.

5.1 Fase topológica de los estados resonantes

Al estudiar el espectro del núcleo de ${}^6\text{Li}$ y de otros núcleos ligeros como el núcleo de ${}^8\text{Be}$, yo había notado la presencia de dobletes de resonancias coherentes y la posibilidad de una degeneración de resonancias. Por otra parte, en la década anterior, el estudio sistemático de las degeneraciones de estados cuánticos en ausencia de simetría había resurgido, asociado al problema de la caracterización de los sistemas cuánticos caóticos por medio de las propiedades estadísticas de sus espectros de energía. Sin embargo, en esas investigaciones había una inconsistencia, pues, si bien la mayor parte de la información experimental sobre las propiedades estadísticas de los estados nucleares se obtenía de medidas cuidadosas de series de resonancias, prácticamente toda la literatura teórica existente hasta 1991 se ocupaba de las degeneraciones de estados ligados estables y sus consecuencias estadísticas en los sistemas caóticos.

Por otra parte, desde 1990, Peter von Brentano³²⁻³⁴ había hecho notar que las observaciones cuidadosas de las mezclas de resonancias coherentes en los espectros nucleares indican claramente que la degeneración de estados resonantes, es decir, no ligados, difiere marcadamente de la degeneración de estados ligados. Para entonces, los métodos matemáticos que habíamos desarrolla-

do nos permitían representar el espectro completo de estados ligados y estados resonantes mediante matrices complejas, de modo simple, directo y exacto, y podíamos estudiar las series espectrales de resonancias de manera unificada, generalizando las técnicas usadas por von Neumann, Wigner³⁵ y Teller³⁶.

En 1991, Antonio Jáuregui, de la Universidad de Sonora, quien estaba de visita en nuestro Instituto de Física, se unió a nosotros en una colaboración que dura hasta la fecha. Al formular el problema del espectro completo de estados ligados y estados no ligados en forma matricial, descubrimos, casi de inmediato, que la degeneración de resonancias cuánticas está asociada a una rica estructura matemática que no había sido encontrada antes en la Mecánica Cuántica. Desde un punto de vista algebraico, la degeneración de resonancias está asociada a matrices con bloques de Jordan y ciclos de Jordan de eigenvectores generalizados, en lugar de las matrices diagonales degeneradas y los subespacios invariantes característicos de las degeneraciones de estados ligados. También, desde el punto de vista geométrico y topológico, las estructuras matemáticas asociadas a la degeneración de estados inestables eran diferentes del cono doble y el punto cónico o diabólico discutido por E. Teller³⁶ en 1937 y popularizadas por M.V. Berry³⁷ en 1984. Este hallazgo nos llenó de entusiasmo, porque, además del atractivo de explorar nuevas matemáticas, era obvio que éstas podrían llevarnos a descubrir y explorar aspectos nuevos de la física.

En colaboración con Enriqueta Hernández y Antonio Jáuregui, en 1992 calculé el factor de fase topológico que adquieren los estados resonantes de un sistema físico debido a la variación temporal lenta y cíclica de los parámetros externos que controlan al sistema. Más específicamente, la variación temporal cíclica de los parámetros externos da lugar a la aparición de una fase geométrica, además de la fase dinámica, en la función de ondas del sistema. La fase geométrica o topológica del sistema se llama así porque sólo depende de la geometría del trayecto que sigue el sistema en el espacio abstracto de los parámetros externos. Esta fase no es integrable y, por consiguiente, no es trivial si el trayecto encierra una degeneración del sistema. Desde 1983, M. V. Berry³⁸ había demostrado estos resultados para el caso de un sistema que inicialmente está en una superposición de estados ligados. En 1992, habiendo ya desarrollado los métodos matemáticos para extender el cálculo de Berry al caso de un sistema que inicialmente está en una superposición de estados resonantes, desarrollamos la teoría de la fase topológica de los estados resonantes. Para entonces, ya se habían propuesto algunos ex-

perimentos para medir la fase topológica en sistemas atómicos con dos niveles de energía, uno de los cuales, al menos, es un estado inestable. Los primeros resultados de nuestro trabajo sobre las fases topológicas de los estados resonantes se publicaron en 1993 en la *Revista Mexicana de Física*³⁹ y, posteriormente, una versión más amplia, completa y detallada apareció en 1996 en *J. of Phys. A.: Mathematical and General*⁴⁰. Una versión aun más amplia de esta teoría, con énfasis en los aspectos topológicos del problema, se publicó en *Lecture Notes in Physics: "Irreversibility and Causality: Semigroup and Rigged Hilbert Spaces"*, Springer, 1998⁴¹. La predicción que hicimos en 1996 y 1998 de la presencia de una fase topológica (fase de Berry) en la evolución adiabática de dos estados resonantes que interfieren fue verificada experimentalmente en una serie de elegantes experimentos sobre interferencia y degeneración de resonancias electromagnéticas en una cavidad metálica excitada por microondas. Estos experimentos fueron hechos por el profesor Achim Richter y su grupo en el Laboratorio de Física Nuclear de la Universidad de Darmstadt^{42,43}.

5.2 Dobletes y degeneración de estados inestables

Presenté nuestros resultados sobre la teoría de la fase topológica de los estados resonantes en varios congresos y simposios internacionales. Nuestros resultados despertaron, de inmediato, el interés de muchos científicos de varios países, aunque no a todos ellos les interesaba nuestro trabajo por las mismas razones. Por una parte, estaban los físicos nucleares experimentales, como el profesor P. von Brentano, de la Universidad de Colonia, Alemania, y el profesor Gary Mitchell, de la Universidad de North Carolina y del Triangle Universities Nuclear Laboratory, en los Estados Unidos, que conocían a fondo el aspecto experimental de la física de las resonancias nucleares y buscaban en nuestro trabajo la explicación de fenómenos novedosos que ellos mismos habían observado.

Peter von Brentano había hecho observaciones muy cuidadosas de las propiedades de los dobletes de resonancias nucleares que se mezclan y había llegado a la conclusión de que los resultados clásicos de von Neumann y Wigner³⁵ sobre la repulsión de niveles cuánticos estables no se aplica al caso de estados inestables que decaen. Al igual que nosotros, von Brentano estaba interesado en encontrar una generalización del teorema de von Neumann-Wigner que se aplicara al caso de estados inestables.

A Gary Mitchell le interesaba el efecto de amplificación de la violación de las simetrías discretas de la Mecánica Cuántica, como paridad, conjugación de carga y reflexión del tiempo (PCT), que ocurre asociado a la degeneración de resonancias en los espectros nucleares. Por aquellos años, se pensaba que este efecto de amplificación de la violación de CP se podría observar también en los sistemas de mesones neutros casi-degenerados, como $K_0 - \bar{K}_0$ y $B_0 - \bar{B}_0$.

Por otra parte, estaban los físicos matemáticos, que se sentían atraídos por los aspectos matemáticos novedosos de nuestro trabajo. Eran varios grupos que trabajaban independientemente, pero que se conocían entre sí y se reunían periódicamente en congresos internacionales de física matemática. Entre ellos están Arno Bohm⁴⁴ y sus estudiantes de la Universidad de Austin, Texas, y Manuel Gadella⁴⁵, de la Universidad de Valencia, España, y sus estudiantes. Habían desarrollado la teoría formal de los estados resonantes o de Gamow como elementos de un espacio de Hilbert aparejado⁴⁶ y estaban interesados en algunos resultados matemáticos formales de nuestro trabajo, que habíamos obtenido con métodos diferentes a los suyos. El profesor Ilya Prigogine y sus asociados, Ioannis Antoniou, de la Universidad Libre de Bruselas, así como Yuri Melnikov, del Laboratorio de Teoría de Sistemas Complejos de San Petersburgo, en Rusia, y George P. Pronko, del Instituto de Física de Altas Energías de Protvino, en Moscú, Rusia, estaban interesados en nuestros resultados sobre el tratamiento matemático de las resonancias y los estados resonantes, porque veían en ellos ejemplos simples y claros de la evolución temporal de sistemas inherentemente irreversibles en la Mecánica Cuántica.

Con frecuencia, los comentarios de los físicos experimentales sobre nuestro trabajo iban en el sentido de que no había un sistema mecánico-cuántico simple y elemental que mostrara polos dobles en la matriz $S(E)$. En tanto que los comentarios de los físicos teóricos a menudo se referían a que nadie había observado nunca una partícula elemental o una resonancia nuclear que correspondiera a un polo doble de la matriz $S(E)$. En resumidas cuentas, hasta 1993 las degeneraciones de resonancias no se habían observado en el laboratorio y en la teoría tampoco se conocían ejemplos simples, elementales y claros en los que este fenómeno se pudiera estudiar. Estos comentarios orientaron nuestro trabajo sobre el tema en los años siguientes.

En 1993 hicimos un análisis numérico detallado del doblete de resonancias 2^+ , $S = 1$ y $T = 1$, del núcleo de ${}^8\text{Be}$ ⁴⁸ y logramos demostrar que este doblete de resonancias coherentes está analíticamente conectado a una degeneración de resonancias. Así, demostramos, con un ejemplo tomado de un ex-

perimento, que la degeneración accidental de dos estados nucleares no ligados, mezclados por una interacción real, está asociada a un polo doble de la matriz de la dispersión, $S(E)$, como función de la energía compleja, y que la degeneración se logra variando sólo dos parámetros reales.

Este resultado, que apareció publicado en abril de 1994, fue especialmente importante, porque los argumentos de von Brentano para demostrar que los resultados clásicos de von Neumann y Wigner sobre repulsión de niveles no se aplican a los estados inestables estaban basados en un análisis del doblete 2^+ del núcleo de ${}^8\text{Be}$ ³². Así, demostramos también la relación existente entre los “cruces” y “anticruces” de energías y anchuras introducidos por von Brentano y nuestros argumentos sobre degeneración de resonancias.

Posteriormente, entre 1999 y 2001, en una serie de cuatro artículos^{49,51}, hicimos un estudio analítico y numérico muy detallado de la formación de dobletes de resonancias y la degeneración de estados no ligados en la dispersión de un haz de partículas por barreras dobles de potencial. Demostramos que se puede inducir la formación de una degeneración de resonancias y la aparición de un polo doble en la matriz de la dispersión, $S(E)$, del sistema, entonando los parámetros de control del mismo. No sólo eso, también calculamos, por integración numérica de una función implícita, las hipersuperficies que representan a las autoenergías complejas en el espacio de los parámetros de control del sistema y exhibimos la topología de Picard-Lefschetz característica de los cruces de resonancias⁵².

En esta serie de trabajos presentamos el primer ejemplo publicado de una degeneración de resonancias en un sistema cuántico, simple y elemental. Además, encontramos una explicación teórica de fenómenos aparentemente inconexos; por una parte, los “cruces” y “anticruces” de energías y vidas medias observados por von Brentano y otros autores, y, por la otra, las fases topológicas que adquieren dos estados resonantes debido a la variación cíclica lenta de los parámetros de control del sistema. Conforme iban saliendo, los resultados se fueron presentando en una serie de conferencias anuales sobre “Time Asymmetric Quantum Theory: Rigged Hilbert Spaces and the Theory of Resonances” que organiza Arno Bohm desde 1994 en diversos países. Allí pudimos constatar el poder de convicción que se gana con los ejemplos simples de los problemas complejos y vimos, con satisfacción, cómo el número de los físicos interesados en este problema ha ido aumentando con el tiempo.

Las propiedades de los “cruces” y “anticruces” de resonancias y su relación con nuestro trabajo fueron verificadas experimentalmente por el profesor

Peter von Brentano en una serie de delicados experimentos de mezcla de resonancias en una cavidad metálica doble excitada con microondas. Estos experimentos fueron realizados en el Laboratorio de Física Nuclear de la Universidad de Colonia en Alemania⁵³⁻⁵⁵.

5.3 Bloques de Jordan y eigenfunciones generalizadas de Jordan-Gamow

Finalmente, cuando ya teníamos las ideas claras y los ejemplos simples, pudimos formular y desarrollar la teoría general de la mezcla y degeneración de estados resonantes en la dispersión por un potencial de corto alcance con dos regiones de atrapamiento y un solo canal abierto. En este trabajo dimos un fundamento matemático firme a la asociación de las degeneraciones de resonancias con ciclos de Jordan de autofunciones generalizadas de Gamow y bloques de Jordan en el desarrollo espectral generalizado y la correspondiente representación matricial compleja del Hamiltoniano del sistema⁵⁶.

Fue así como la formulación y desarrollo de la teoría de la mezcla y degeneración de estados resonantes nos reveló varios aspectos algebraicos y topológicos de la Mecánica Cuántica que no eran conocidos. Además, nos permitió hacer predicciones teóricas sobre efectos físicos novedosos que posteriormente fueron confirmados experimentalmente.

6. La simetría del sabor de los quarks y los leptones

6.1 Masas y mezclas de quarks y la violación de CP.

En los últimos años, también he dedicado una parte considerable de mi tiempo a investigar algunos aspectos de tres de los problemas más importantes de la Física de las Partículas Elementales contemporánea. Estos problemas son: La naturaleza jerárquica del espectro de las masas de los quarks y los leptones, las mezclas de los campos de los quarks o los leptones de diferentes “sabores” producida por la interacción electrodébil cargada y la violación de la simetrías de conjugación de carga y paridad o CP.

A estos problemas llegué por dos caminos. Primero, en 1994 mi interés en la física de la degeneración de los estados nucleares o resonancias nucleares me llevó a un gran congreso en Dubna, Rusia, sobre las interacciones de

los neutrones con núcleos pesados, como los núcleos de Uranio y de Torio. Allí leí un trabajo sobre fases topológicas de los estados resonantes y oí algo más de veinte trabajos sobre series de resonancias nucleares producidas por el bombardeo de diversos núcleos pesados con neutrones. Se discutía con especial interés la violación de las simetrías discretas de la paridad, P , y la reflexión del tiempo, T , en las interacciones nucleares. El efecto de violación de P , que en los núcleos normalmente es muy pequeño, se había logrado medir porque, cuando la absorción de un neutrón por un núcleo de Uranio excita dos resonancias coherentes de energías casi iguales, esta casi-degeneración de resonancias produce una gran amplificación del efecto de violación de P .

Por otra parte, a principios de 1996, Ezequiel Rodríguez Jáuregui, que había sido alumno de mis cursos de Partículas Elementales y de Teoría Cuántica del Campo, me pidió que le diera un tema de tesis doctoral, pero especificó que quería que el tema fuese de física de partículas elementales. Esta petición me llevó a considerar la cuestión del papel que podría jugar la degeneración de resonancias en la violación de las simetrías discretas P , C y T en las partículas elementales.

Ahora bien, en las partículas elementales, la violación de P ocurre en las interacciones electrodébiles siempre e independientemente de que el proceso sea o no resonante. Sin embargo, los efectos de violación de CP y T se observan en forma por demás espectacular en sistemas de “mesones que se mezclan”, es decir, en mesones neutros, pseudoescalares, cuyo estado físico es una mezcla de dos estados cuánticos que oscilan entre estados de partícula y antipartícula. Siendo los mesones “resonancias”, esto es, partículas inestables que decaen con una vida media muy corta, esto significa que el mesón neutro que se observa en el laboratorio se encuentra en un estado físico que es una mezcla de dos resonancias cuánticas casi-degeneradas que oscilan entre estados cuánticos con valores opuestos de CP , que podríamos llamar K_1 y K_2 .

Aquí podría encontrarse el tema de tesis que pedía Ezequiel, pero antes había que plantear el problema en términos de los principios básicos de la física, y no meramente en términos de una analogía, que podría ser superficial. De este modo, se llega a la siguiente cuestión: ¿Cuál es la física fundamental que causa la mezcla de los autoestados de CP en el kaón neutro?

La respuesta es simple pero, para poder explicarlo, recordemos que los componentes elementales de la materia son los leptones y los quarks. Los mesones neutros, al igual que todos los hadrones, son sistemas compuestos de quarks y antiquarks.

En la naturaleza hay tres generaciones de leptones y quarks; cada generación o familia se distingue de las otras por una propiedad que se llama “sabor”. Además del “sabor”, los quarks y leptones de una generación difieren de los de otra generación solamente por el valor de sus masas. Si los quarks y leptones no tuvieran masa, al intercambiar un sabor por otro no cambiaría nada de la física. La teoría sería invariante respecto de las permutaciones del “sabor”.

Cada generación tiene dos tipos de leptones y quarks que difieren en el valor de su carga eléctrica. En el caso de los leptones, estos dos tipos son los neutrinos y los electrones. En el caso de los quarks, estos son de tipo u y de tipo d .

Las interacciones electrodébiles cargadas cambian el tipo de los quarks o leptones: al emitir un bosón vectorial cargado, un quark de la primera familia y de tipo u pierde una unidad de carga eléctrica y se transforma en un quark de tipo d . Debido a que las masas de los quarks de un tipo no son iguales a las masas de los quarks del otro tipo, el quark de tipo d que resulta es una mezcla de los tres sabores posibles de este tipo. Así, pues, la interacción electrodébil cargada mezcla los sabores de los quarks o leptones.

Ahora, en forma algo simplificada, podemos describir a un kaón neutro (u, \bar{s}) como un sistema compuesto de un quark d y un antiquark \bar{s} , es decir la pareja unida por la fuerza nuclear fuerte. La interacción electrodébil, actuando dos veces, cambia al par (d, \bar{s}) en un par del mismo tipo, pero, debido a que esta fuerza mezcla los sabores, los quarks d y s pueden ser intercambiados, y el resultado será el par (s, \bar{s}) que no es otra cosa que el antikaón neutro. Antes había descrito al kaón físico como una mezcla de dos autoestados de CP , que llamamos K_1 y K_2 , al intercambiar K_0 por su antipartícula, \bar{K}_0 , la interacción débil permite que se intercambien K_1 y K_2 . Este intercambio da lugar a la violación de la simetría CP . Así llegué a la respuesta de la pregunta que me había planteado: En términos de partículas e interacciones fundamentales, la violación de CP está asociada a la mezcla del “sabor” de los quarks por las interacciones electrodébiles cargadas.

En el Modelo Standard, que es la teoría del campo de las partículas y las interacciones fundamentales actualmente vigente, las mezclas del “sabor” se describen de modo simple y natural en términos de una matriz, llamada la matriz de mezclas de Cabbibo, Kobayashi y Maskawa o matrix CKM. Debido a que hay tres generaciones, esta matriz tiene, además de tres ángulos de mezcla, un factor de fase irreducible. Es este factor de fase de Kobayashi y Maskawa

wa el responsable de la violación de CP y T . Así, pues, la casi-degeneración de las resonancias en el kaón neutro juega el papel de un interferómetro, que permite observar la fase de Kobayashi y Maskawa.

Sin embargo, en el Modelo Standard, la replicación de las generaciones de quarks y leptones, así como el espectro jerárquico de sus masas, quedan sin explicación. En consecuencia, las masas de quarks y leptones, así como los tres ángulos de mezcla y la fase que viola CP aparecen en el Modelo Standard como constantes indeterminadas, cuyo valor se fija por comparación con el experimento. A esto hay que agregar que el conocimiento de las masas de las partículas, quarks o leptones, y las magnitudes de los elementos de las correspondientes matrices de mezclas, que podían extraerse de los experimentos, no bastan para reconstruir la matriz de masas. En consecuencia, no es posible obtener tan sólo del Modelo Standard una relación que ligue a las masas de los quarks y leptones con los ángulos de mezcla y las fases que violan CP . Debido a esto, la teoría tiene 18 parámetros libres.

Así, pues, la explicación de la jerarquía de las masas de los quarks, así como el cálculo de la magnitudes de los ángulos de mezcla y de la fase que viola CP , se encuentran en física nueva, que va más allá del Modelo Standard.

Esta física nueva podría ser una simetría del sabor y su rompimiento (o violación), elementos que habría que agregar al Modelo Standard.

Por fin, aquí tenía el tema de tesis que Ezequiel me pedía porque, si la jerarquía de las masas de los quarks se originase en una simetría del sabor, se podrían obtener las matrices de masas de los quarks en forma explícita y con un número reducido de parámetros libres. A partir de aquí podríamos calcular la matriz de mezclas CKM y la fase que viola CP .

Así fue como, durante 1997, y en colaboración con Ezequiel Rodríguez Jáuregui, me dediqué a obtener matrices de masas de los quarks, a partir de diferentes grupos finitos y no abelianos de simetrías del sabor y de su rompimiento espontáneo o explícito. Muy pronto nos dimos cuenta de que el grupo de permutaciones de tres objetos, S_3 , es un buen candidato.

Pudimos discutir nuestro problema con el profesor Prabahan K. Kabir, experto mundial en violación de CP y T , a quien yo conocía desde mis días de estudiante en Birmingham, Inglaterra, y quien estuvo de visita con nosotros en el Instituto de Física de febrero a mayo de 1997.

A finales de ese año, ya habíamos avanzado un buen trecho en el desarrollo de una teoría con poder predictivo de la mezcla de los sabores y del fenómeno de la violación de CP . A partir de estos resultados obtuvimos la

matriz de mezclas CKM y la fase que viola CP en función de las masas de los quarks y sólo dos parámetros que miden el rompimiento de la simetría del sabor.

En ese momento, sólo había datos experimentales de buena calidad sobre mezclas de quarks en procesos que no violan CP . La información experimental segura sobre procesos en los que se viola CP provenía solamente de las medidas de la violación de CP indirecta en el sistema de los kaones neutros. Desde 1987 se habían observado las oscilaciones en el sistema $B_0 - \bar{B}_0$, y se estaban haciendo experimentos en algunos de los grandes laboratorios en diversos países para observar la violación de CP en este sistema, pero los resultados aún no estaban disponibles. La violación de CP directa había sido medida en el Laboratorio del Centro Europeo de la Investigación Nuclear (CERN) desde 1988 y en el Laboratorio Enrico Fermi (Fermilab), de Chicago, pero los resultados no coincidían. La violación de la reflexión del tiempo T no había sido medida todavía, pero dos grandes laboratorios hacían experimentos para medirla. En este campo de la física se vivían momentos de gran excitación y expectación.

A fines de 1997, dimos por buenos los resultados de CERN e hicimos un ajuste numérico de nuestras fórmulas a todos los datos experimentales disponibles hasta esas fechas. Estos primeros resultados fueron presentados en el Simposio de Física Nuclear de Oaxtepec en enero de 1998⁵⁷. El resto de ese año lo dedicamos a refinar nuestros cálculos, agregando nuevos datos sobre oscilaciones del sistema $B_s^0 - \bar{B}_s^0$, y a escribir una versión más amplia y detallada de la teoría, que fue enviada a la *Phys. Rev. D* en noviembre de ese año⁵⁸.

Muy pronto nos dimos cuenta de que el trabajo no estaba pasando inadvertido. Desde marzo de 1998, habíamos puesto la primera versión de nuestro trabajo en el banco de datos del Laboratorio de Los Álamos. Dos semanas después recibí una invitación del profesor Sandip Pakvasa para presentar los resultados de este trabajo en el Taller sobre Violación de CP (Joint Workshop on CP Violation of the Special Research Centre for the Subatomic Structure of Matter and AUSHEP) en Adelaide, Australia, en julio de 1998⁵⁹. Casi inmediatamente después, R. Delbourgo me invitó a presentar este trabajo en el XXII International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics, en Hobart, Tasmania⁶⁰. Un par de meses después recibí una invitación para participar en el Taller sobre Violación de CP (Kaón 99) que se celebró en Chicago, en junio de 1999, en donde nuestro trabajo fue comentado por el profesor Roberto Peccei en la sesión inaugural⁶¹. Este oportuno

comentario fue hecho cuando el artículo de *Phys. Rev. D*, que contenía esos resultados, salía publicado, lo que sin duda contribuyó a que llegaran nuevas invitaciones a congresos internacionales y a que estos primeros resultados fueran citados numerosas veces por otros autores.

En la reunión de Chicago nos enteramos de los resultados más recientes de Fermilab sobre la medición de la violación de CP directa en el sistema $K_0 - \bar{K}_0$ y de los primeros resultados de las medidas de la violación de la simetría respecto de la reflexión del tiempo, T , en el mismo sistema. Ahora, los resultados de CERN y Fermilab coincidían.

Estas fueron noticias muy excitantes, pues estos nuevos resultados experimentales confirmaban los valores de los ángulos de mezcla y la fase que viola CP que habíamos extraído del análisis de los datos experimentales anteriores con nuestro modelo teórico. Nos apresuramos a hacer un nuevo análisis de todos los datos experimentales, incluyendo los datos sobre violación de CP directa y la violación de T en el sistema $K_0 - \bar{K}_0$ obtenidos en Fermilab. Además, presentamos los resultados en tres representaciones de la teoría: la forma adaptada a la simetría, la forma de Wolfenstein y la forma recomendada por el Particle Data Group, con el propósito de facilitar la comparación de nuestros resultados con los datos experimentales⁶²⁻⁶⁴.

Este material y algo más fue incluido en una excelente tesis doctoral que presentó Ezequiel Rodríguez Jáuregui en la Facultad de Ciencias en septiembre de 2000, como parte de los requisitos para obtener el grado de doctor en Ciencias. En mayo de 2001, esta tesis fue seleccionada por el Comité Académico del Posgrado UNAM como la mejor tesis doctoral en Física del año 2000, para su publicación en la “Colección Posgrado 2001” DGEF-UNAM.

Hasta antes de junio de 2001, los datos experimentales sobre asimetría CP en las oscilaciones del sistema $B_0 - \bar{B}_0$ y la violación de CP en este sistema provenientes de diferentes laboratorios discrepaban entre sí hasta en un 100% y tenían errores muy grandes. Los nuevos y mucho más precisos datos experimentales sobre violación de CP y oscilaciones en el sistema $B_0 - \bar{B}_0$ obtenidos por los grupos de BELLE⁶⁵ y BABAR⁶⁶ coincidieron finalmente, en junio de 2001, y dejaron establecido como un hecho cierto que “todos los datos experimentales sobre violación de CP y T medidos en el laboratorio se pueden describir correctamente en el Modelo Standard con un sólo número, la fase de Kobayashi-Maskawa”⁶⁷.

Ver cómo los nuevos datos experimentales más precisos convergían a los valores que habíamos predicho, fue una experiencia muy grata y emocionante.

Esos mismos datos experimentales, que parecían confirmar nuestros resultados, y la información más reciente sobre las masas de los neutrinos, me plantearon nuevas tareas.

Por una parte, la gran cantidad de datos muy precisos sobre violación de CP en el sector de los quarks puso de manifiesto que el valor de la masa del quark u que habíamos usado en los cálculos de la matriz CKM era demasiado grande.

Por la otra, las observaciones de las oscilaciones de los neutrinos entre estados de diferente sabor⁶⁸⁻⁷⁰, hechas entre 1998 y 2002, habían proporcionado pruebas seguras de que hay física nueva más allá del Modelo Standard. La medición de los parámetros de las oscilaciones de los neutrinos había permitido hacer la determinación de los valores del cuadrado de las masas de los neutrinos, y se había encontrado que, tal como ocurre en el caso de los quarks, la interacción electrodébil cargada mezcla los sabores de los neutrinos y puede dar lugar a la violación de la simetría CP .

En agosto de 2002, en colaboración con Myriam Mondragón, mi hija, empecé a considerar la posibilidad de formular una extensión o generalización del Modelo Standard, agregándole una simetría permutacional del sabor, S_3 , que fuese común a los quarks y los leptones. El rompimiento espontáneo de esta simetría nos podría dar la explicación de las jerarquías de las masas, las propiedades de las mezclas de sabores y la presencia de las fases que violan CP , tanto en el caso de los quarks, como en el caso de los leptones, es decir, los neutrinos y los electrones.

En septiembre de ese año, llegó a nuestro Instituto el profesor Jizuke Kubo, de la Universidad de Kanazawa, Japón, invitado por Myriam Mondragón a pasar cinco meses en el Departamento de Física Teórica y continuar con ella una fructífera colaboración de varios años, en la que habían tenido algunos éxitos muy notables en el cálculo de la masa de los quarks. Ahora, ambos estaban interesados en calcular la masa del bosón de Higgs. Kubo también estaba interesado en encontrar una generalización del Modelo Standard que, además de otros requisitos, fuese invariante respecto de un grupo de simetría del sabor. Así que él también se había ocupado activamente de este problema.

Después de examinar el problema con Myriam y Kubo, modificamos la teoría de dos maneras. Primero, incluimos en la simetría permutacional a los leptones. Segundo, abandonamos la suposición implícita en el Modelo Stan-

dard de que el bosón de Higgs no tiene sabor. Esta última modificación fue la clave de la solución del problema, porque los datos experimentales sobre las masas de los quarks y los neutrinos nos estaban diciendo que no se puede tener simultáneamente una simetría del sabor exacta y un bosón de Higgs que no tenga sabor. Si la simetría del sabor no es exacta y no se rompe espontáneamente, de modo conveniente, hay que romperla “a mano”, pero ya sabíamos que eso nos daría un valor muy grande de la masa del quark u . Entonces, había que considerar la otra posibilidad, que el bosón de Higgs tuviese sabor. Siendo el bosón de Higgs la única partícula del Modelo Standard que no ha sido observada, y no habiendo ninguna evidencia experimental en contra, podíamos suponer que el bosón de Higgs tiene sabor, sin contradecir ningún dato experimental y sin hacerle violencia a la teoría.

En febrero de 2003, en colaboración con Jizuke Kubo, Myriam Mondragón y Ezequiel Rodríguez Jáuregui, propusimos una Extensión Mínima del Modelo Standard, invariante bajo la acción del grupo del sabor, en la que esta simetría incluye las transformaciones del sabor de los quarks, de los leptones y del bosón de Higgs. Así, logramos calcular las matrices de masas y las matrices de mezclas de los leptones y de los quarks. Reprodujimos los resultados obtenidos anteriormente para los quarks y calculamos valores numéricos de las masas y de las mezclas de los neutrinos en excelente acuerdo con los datos experimentales mejores y más recientes (febrero de 2003) sobre las oscilaciones de los neutrinos⁷¹.

De este modo, una hipótesis simple sobre la simetría permutacional del sabor nos ha permitido construir un modelo teórico con poder predictivo de la mezcla de los sabores y del fenómeno de la violación de CP en los leptones y los quarks de manera unificada.

Sin embargo, deberemos esperar hasta que el bosón de Higgs sea observado para saber si ya hemos identificado una simetría de la naturaleza que unifica la descripción de varios fenómenos en apariencia inconexos.

Referencias

- ¹ Prieto, F. E., *Rev. Mex. Fís.*, 24 (1954).
- ² Prieto, F. E., *Phys. Rev.*, 974 (1955).
- ³ De Oyarzábal, J., *Phys. Rev.*, 974 (1955).
- ⁴ Medina, A., *Phys. Rev.*, 978 (1955).
- ⁵ Mondragón A., *Phys. Rev.*, 956 (1955).

- ⁶ Prieto, F. E., *Phys. Rev.*, 1439 (1957).
- ⁷ Prieto, F. E., *Nucl. Phys.*, 456 (1959).
- ⁸ Cocho G., *Rev. Mex. Fís.*, 215 (1962).
- ⁹ Cocho, G., Colón-Vela, M. y Mondragón, A., *Rev. Mex. Fís.*, 59 (1968).
- ¹⁰ Cocho, G. & Mondragón, A., *Nucl. Phys.*, A 125, 417 (1969).
- ¹¹ Cocho, G., Colón-Vela, M. & Mondragón A., *Nucl. Phys. A* 128, 110 (1969).
- ¹² Cocho, G., Flores J. & Mondragón A. *Nucl. Phys. A* 128, 110 (1969).
- ¹³ Cocho, G. & Mondragón, A., *Phys. Rev.*, D 1, 3484 (1970).
- ¹⁴ *Nuclear Tables Preliminary version 2*. TUNL Nuclear Data Evaluation Project, D. R. Tilley, C. M. Cheves, J. L. Godwin, G. M. Hale, H. M. Hofmann, J. H. Kelley & H. R. Weller (pueden ser consultadas en <http://www.tunl.duke.edu/nucldata>)
- ¹⁵ A. Mondragón & E. Hernández, *Phys. Rev.*, C 41, 1975 (1990).
- ¹⁶ E. Hernández & A. Mondragón, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 1339 (1990).
- ¹⁷ A. Mondragón & E. Hernández, *Inst. Phys. Conf. Ser.* (1988) S794; A. Mondragón & E. Hernández, 6th Inter. Symp. on Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Leuven (1987).
- ¹⁸ F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys. A* 490 (1988) 1 (Nuclear Tables); F. Ajzenberg-Selove, *Nucl. Phys. A* 320, 1 (1979) (Nuclear Tables).
- ¹⁹ D. R. Tilley, C. D. Cheves, J. L. Godwin, G. M. Hale, H. H. Hofmann, J. H. Kelley & S. L. Godwin, "Nuclear Tables: Energy Levels of Light Nuclei A = 5, 6, 7", *Nuclear Physics A* 708 (1-2), 3-163 (2002).
- ²⁰ R. E. Peierls, "Interpretation and properties of propagators" en *Proceedings of the 1954 Glasgow Conference on Nuclear and Meson Physics*, editado por E. H. Bellamy y R. G. Moorhouse. Pergamon Press. London & New York, 1955, pp. 296-299.
- ²¹ R. E. Peierls, *Proc. Roy. Soc.*, A 253, 16 (1959).
- ²² E. Hernández & A. Mondragón, *Phys. Rev.*, C 29, 722 (1984).
- ²³ A. Mondragón, "Quantum Chaos and Statistical Nuclear Physics", en *Lecture Notes in Physics*. Springer-Verlag, Heidelberg, 353 (1986).
- ²⁴ A. Mondragón, E. Hernández & J. M. Velázquez, *Annalen der Physik*, 503 (1991).
- ²⁵ S.L. Blatt, A. M. Young, S. C. Ling, K. J. Moon & D. D. Porterfield, *Phys. Rev.*, 1147 (1968).
- ²⁶ E. Ventura, C. C. Chang & W. E. Meyerhof, *Nucl. Phys.*, A 173, 1 (1971); E. Ventura, J. R. Calarco & W. E. Meyerhof, *Phys. Lett.*, B, 364 (1973).
- ²⁷ R. Vlastou, J. B. A. England, O. Karban & S. Baird, *Nucl. Phys.*, A 292, 29 (1977).
- ²⁸ D. R. Thompson & Y. C. Tang, *Nucl. Phys.*, A 106, 591 (1968); D. R. Thompson & Y. C. Tang, *Phys. Rev.*, 971 (1969).
- ²⁹ V. G. Neudatchin, V. I. Kukulin, V. N. Pomerantsev & A. A. Sakharuk, *Phys. Rev.*, C 45, 147 (1992).
- ³⁰ H. Ohkura, T. Yamada & K. Ikeda, *Prog. Theor. Phys.*, Kyoto, 47 (1995).
- ³¹ S. B. Dubovichenko, A. V. Dzhezairov-Kakhramanov, *Phys. Atom. Nucl.*, 788 (1995); S. B. Dubovichenko, A. V. Dzhezairov-Kakhramanov, *Phys. Part. Nuclei.*, 615 (1997).
- ³² P. von Brentano, *Phys. Lett.*, B, 1 (1990).
- ³³ P. von Brentano, *Phys. Lett.*, B, 320 (1990).
- ³⁴ P. von Brentano, *Phys. Lett.*, 14 (1990).
- ³⁵ J. von Neumann & E. Wigner, *Z. Phys.*, 467 (1929).
- ³⁶ E. Teller, *J. Phys. Chem.*, 109 (1937).
- ³⁷ M. V. Berry, "Aspects of Degeneracy", en *Quantum Chaos*, Ed. G. Casati, Plenum Press, Londres (1985).
- ³⁸ M. V. Berry, *Proc. Royal Society Ser.*, A 392, 45 (1984).
- ³⁹ E. Hernández, A. Jáuregui & A. Mondragón, *Rev. Mex. Fís.* (S2) 128 (1992).
- ⁴⁰ A. Mondragón & E. Hernández, *J. Phys. A: Math. and Gen.*, 2567 (1996).
- ⁴¹ A. Mondragón & E. Hernández, "Accidental Degeneracy and Berry Phase of Resonant States" en *Irreversibility and Causality: Semigroups and Rigged Hilbert Space*, Lecture Notes

- in Physics vol., Eds. A. Bohm, H.-D. Doebner & P. Kielanowski, Berlin, Springer, p. 257 (1998).
- ⁴² C. Dembowski, H.-D. Gräf, H. L. Harney, A. Heine, W. D. Heiss, H. Rehfeld & A. Richter, *Phys. Rev. Lett.*, 787 (2002).
- ⁴³ C. Dembowski, B. Dietz, H.-D. Gräf, H. L. Harney, A. Heine, W. D. Heiss & A. Richter, *Phys. Rev. Lett.*, 034101-1 (2003).
- ⁴⁴ A. Bohm, *J. Math. Phys.*, 60-72 (1997).
- ⁴⁵ I. Antoniou, M. Gadella & G. Pronko, *J. Math. Phys.*, 24:59 (1998).
- ⁴⁶ A. Bohm & M. Gadella, "Dirac Kets, Gamow Vectors and Gel'fand Triplets", *Lecture Notes in Physics Vol.*, Springer-Verlag, Berlin (1989).
- ⁴⁷ I. E. Antoniou, M. Gadella, E. Hernández, A. Jáuregui, Yu. Melnikov, A. Mondragón & G. P. Pronko, "Chaos, Solitons and Fractals", 27:19 (2001).
- ⁴⁸ E. Hernández & A. Mondragón, *Phys. Lett.*, B 326, 1 (1994).
- ⁴⁹ A. Mondragón & E. Hernández, *J. Phys. A: Math. and Gen.*, 5595 (1993).
- ⁵⁰ E. Hernández, A. Jáuregui & A. Mondragón, *J. Phys. A: Math. and Gen.*, 4507 (2000).
- ⁵¹ E. Hernández, A. Jáuregui & A. Mondragón, *Few-Body Systems Suppl.*, 206 (2001).
- ⁵² E. Hernández & A. Jáuregui & A. Mondragón, *Rev. Mex. Fís.* (2003), en prensa.
- ⁵³ Michael Philipp, "Mesung von Mikrowellenresonanzen und deren Beschreibung mit Methoden der Kernphysik", desis doctoral presentada ante la Matematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät de la Universidad de Colonia (1997).
- ⁵⁴ M. Philipp, P. von Brentano, G. Pascovici & A. Richter, *Phys. Rev. E*, 1922 (2000).
- ⁵⁵ P. von Brentano, *Rev. Mex. Fís.*, (S1), 1 (2002).
- ⁵⁶ E. Hernández, A. Jáuregui & A. Mondragón, *Phys. Rev. A*, 022721-1 (2003).
- ⁵⁷ A. Mondragón & E. Rodríguez-Jáuregui, *Rev. Mex. Fís.*, (S2) 33 (1998).
- ⁵⁸ A. Mondragón & E. Rodríguez-Jáuregui, *Phys. Rev. D*, 093009-1 (1999).
- ⁵⁹ A. Mondragón & E. Rodríguez-Jáuregui, "Mass Textures and the Mixing Matrix from Flavour Permutational Symmetry Breaking", en *Joint Workshop on CP violation of the Special Research Centre for the Subatomic Structure of Matter*. Ed. A. W. Thomas. World Scientific, Singapore (1999).
- ⁶⁰ A. Mondragón & E. Rodríguez-Jáuregui, "The Quark Mixing Matrix from the Breaking of the $S_L(3) \times S_R(3)$ Flavour Symmetry" en *Group22. Proc. of the XII International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics*. Eds. S. P. Corney, R. Delbourgo & P. D. Jarvis. International Press Inc., Boston (1999).
- ⁶¹ R. Peccei, "Overview of Kaon Physics" en *Kaon Physics*, Eds. J. Rosner & B. L. Winstein. The University of Chicago Press. Chicago, USA, (2001).
- ⁶² A. Mondragón & E. Rodríguez-Jáuregui, *Phys. Rev. D*, 113002-1 (2000).
- ⁶³ A. Mondragón & E. Rodríguez-Jáuregui, *Rev. Mex. Fís.*, (S1), 5 (2000).
- ⁶⁴ A. Mondragón, T. Rivera Torres & E. Rodríguez-Jáuregui, *Rev. Mex. Fís.*, (S2), 17 (2001).
- ⁶⁵ M. Yamauchi *et al.* (BELLE Collaboration), en *Proceedings of the 31st International Conference on High Energy Physics*. Amsterdam, 24-31 Julio, 2002.
- ⁶⁶ Y. Kariotakis *et al.* (BABAR Collaboration) en *Proceedings of the 31st International Conference on High Energy Physics*. Amsterdam 24-31 Julio, 2002.
- ⁶⁷ Yosif Nir, "CP Violation: The CKM Matrix and New Physics", *arXiv: hep-ph/0208080 v2*, 19 August 2002.
- ⁶⁸ Fukuda *et al.* (Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, 3999 (2000); *Ibid.*, 3656 (2001).
- ⁶⁹ Q. R. Ahmad *et al.* (SND Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, 01301 (2001).
- ⁷⁰ A. B. McDonald, *Nucl. Phys. B*, 21 (2001).
- ⁷¹ J. Kubo, A. Mondragón, M. Mondragón & E. Rodríguez-Jáuregui, *Progress of Theoretical Physics*, 795 (2003).

Alfonso Mondragón Ballesteros: Semblanza

Myriam Mondragón Ceballos

Instituto de Física

Con la intención no basta, hay que hacer las cosas bien. Éste es el lema que ha guiado la carrera de Alfonso Mondragón, el cual aprendió de su padre, un famoso y respetado médico.

Alfonso Mondragón Ballesteros nació el 14 de marzo de 1932 en Toluca, en el seno de una familia con un gran amor por la cultura. Es el primero de los seis hijos de Joaquín Mondragón Forgues y Rebeca Ballesteros Garibay. Estudió la primaria en el Centro Escolar Lázaro Cárdenas y la secundaria y preparatoria en el prestigioso Instituto Científico y Literario Autónomo del Estado de México (1945-1949), entonces considerado como una de las mejores preparatorias del país. En 1950 se mudó a la Ciudad de México a estudiar una carrera universitaria. Estuvo en un principio inscrito en Ingeniería Química y Matemáticas, y asistía como oyente a los cursos de Medicina. Un año después se decidió por la Física, y terminó su licenciatura en 1955. Al siguiente año se casó con Myriam Ceballos García-Santibáñez, su novia desde la secundaria, con la que tiene cuatro hijos.

En 1954 ingresó al Instituto de Física de la UNAM como investigador asociado y a la Facultad de Ciencias como maestro. En 1957 se fue a Inglaterra al Departamento de Física Matemática de la Universidad de Birmingham, a realizar los estudios de doctorado, el cual obtuvo en 1960, bajo la dirección de sir Rudolf E. Peierls. A su regreso a México, en 1961, se unió de nuevo al Instituto de Física, en el cual ha trabajado ininterrumpidamente desde entonces.

La carrera científica de Alfonso Mondragón se ha distinguido por su equilibrio entre la investigación y la docencia. En la investigación se ha distinguido por la profundidad de su conocimiento de la física matemática y en la originalidad para aplicarla en diferentes áreas de la física teórica. En la docencia, por la dedicación y empeño que ha puesto en cada uno de sus estudiantes y en los muchos y variados cursos impartidos. Esta dedicación, devoción a la ciencia -casi obsesión-, amor por el detalle y perfeccionismo, se notan

también en el cuidado que pone en la calidad de toda su labor académica, ya sea en un artículo de investigación de espacios de Hilbert aparejados, una clase de teoría de norma, una entrevista de difusión de la ciencia, o el arbitraje de un artículo.

Alfonso Mondragón aprendió esta dedicación por la vida académica del ejemplo de sus maestros Manuel Sandoval Vallarta, Marcos Moshinsky y, sobre todo, de Rudolf Peierls, el cual dirigió su tesis de doctorado. Sir Rudolf fue uno de los físicos más distinguidos y versátiles que tuvo el siglo pasado y en las décadas de 1950 y 1960 era Jefe del Departamento de Física Matemática de la Universidad de Birmingham, entonces reconocido como un centro mundial de la física teórica. Él decía de sí mismo que no era físico, sino matemático impuro. Esta manera de explorar la física se la transmitió Rudi o el "Prof" (como lo llamaban cariñosamente sus alumnos) a Alfonso. Las bases matemáticas las aprendió en México, donde tuvo como maestro, entre otros, a Salomon Lefschetz. El primer año de la carrera lo inscribió Lefschetz en un curso de doctorado junto con E. Lluís y H. Cárdenas. Entonces pensó Alfonso que realmente la Universidad era un poco más difícil que la prepa.

A su regreso a México se encontró con el mismo reto que muchos de sus compañeros de generación, la formidable tarea de dar clases (muchas) y organizar la entonces incipiente Facultad de Ciencias, hacer investigación y formar estudiantes, todo en un medio que apenas empezaba, o, como lo dice este ciclo de conferencias: la tarea de "forjar la ciencia en la UNAM" (o en el país).

Investigación

La pasión de Alfonso Mondragón ha sido la Física y, en particular, la Física matemática. La profundidad de su conocimiento de ésta y la originalidad de sus aportaciones le han valido el respeto y admiración de sus colegas en el ámbito internacional. Ha aplicado este conocimiento con mucho éxito en varias áreas de la Física teórica y la Química nuclear, como lo atestiguan las más de ochenta publicaciones en su haber. Pero no sólo ha trabajado en Física matemática, sino en otros campos de la Física y, también, en Química nuclear. Ejemplos de la diversidad de su obra científica están en:

La Física nuclear. En los trabajos sobre los estados excitados de paridad negativa en el espectro del núcleo de ${}^6\text{Li}$, y los valores numéricos de los parámetros que los describen, los cuales son los valores oficiales de referencia

en las Tablas Nucleares. Este trabajo lo realizó con su estudiante y ahora colaboradora Enriqueta Hernández.

La mecánica cuántica moderna de las resonancias. Con el estudio de las representaciones matriciales complejas y los bloques y ciclos de Jordan de eigenfunciones generalizadas, las estructuras topológicas de Picard-Lefschetz de las hojas de energía, las fases topológicas de estados resonantes, clases de Chern y otros invariantes topológicos. Estos resultados tienen aplicaciones importantes en los sistemas mesoscópicos, moleculares, atómicos y, sobre todo, en las resonancias nucleares y partículas elementales. Todas estas estructuras nuevas de resonancias en la mecánica cuántica han sido confirmadas recientemente por varios grupos experimentales y constituyen un avance clave que ha abierto brecha en el campo. Este importante trabajo fue realizado también junto con E. Hernández.

La Física de partículas. Donde fue uno de los primeros en dedicarse a este tema en la UNAM, junto con Germinal Cocho, en un trabajo sobre el límite no-relativista de la representación de Regge-Joos. Esta línea de investigación fue abandonada por varios años para colaborar con M. Mazari en la formación de un grupo de Física nuclear en el ININ (Salazar). Recientemente ha retomado con mucho éxito la investigación en la Física de partículas elementales, al proponer una simetría permutacional del sabor, la cual trata exactamente igual a las tres familias de quarks y leptones y reproduce muy bien los datos experimentales. Este trabajo fue la tesis de doctorado de Ezequiel Rodríguez, con el cual sigue colaborando.

En Química nuclear. Dirigió varias tesis de investigación en temas como reacciones químicas posteriores a la irradiación de Telurio con neutrones, física del depósito de energía de partículas cargadas en vidrio y su aprovechamiento para construir y fabricar detectores de partículas alfa (todavía se usan para medir emanaciones de radón en volcanes y el suelo), la físico-química y técnicas de aniquilación de positronio en la formación de micelas, entre otros. Éstas fueron varias tesis de maestría y doctorado, entre ellas las de Silvia Bulbulián, Nuria Segovia y Luz Alicia Fukugauchi.

La Física de estado sólido. Donde hizo uso del grupo de renormalización en la determinación de la termodinámica de los cambios de fase en sistemas de dos dimensiones, junto con su entonces estudiante Mónica Olvera.

La termodinámica. En problemas de materiales comprimidos por choque en el límite de presiones muy altas, en la tesis de licenciatura de Ma. Blanca Astíz, entre otros.

Las matemáticas. Con la demostración de los teoremas de Harari de la topología de conjuntos.

La variedad de sus intereses en investigación abarca también la aplicación experimental y práctica de la Física. Esto se nota en el diseño que hizo, junto con Marcos Mazari, de un analizador de polarización para reacciones nucleares iniciadas con protones y deuterones, el cual fue construido y probado exitosamente en la década de 1970. Además, en el cálculo que hizo de la precesión del spin y las órbitas de las partículas en el analizador de polo hendido de tipo Enge, lo cual permitió a Mazari hacer el diseño de los polos y los "cachadores".

En lo práctico, en la patente para un nuevo método de producción de Molibdeno 99, haciendo uso del efecto químico de la reacción (n, y) en halogenuros de Molibdeno, junto con su alumna L. Fukugauchi y A. Maddock, S. Millán y M. Solache; y en la patente de la producción de Bromobenceno y otros derivados marcados con Bromo-82, por transición isomérica, también con L. Fukugauchi y A. Rodríguez.

Por muchos años fue asesor de la Comisión de Energía Nuclear; después, del Instituto Nacional de Energía Nuclear y del ahora Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. En colaboración con el profesor Alfred G. Maddock, jefe del Lensfield Laboratory de la Universidad de Cambridge, Inglaterra, y con el profesor Hans J. Ache, entonces jefe del Laboratorio de Hot Atom Chemistry de la Universidad de Virginia y después director del Programa de Radioisótopos de Alemania, creó y consolidó el grupo de química nuclear del ININ. Todos los viernes por once años iba a reunirse con el grupo al que cariñosamente se refería como su "harem".

Docencia

Como el profesor Peierls le enseñó, la labor académica de un científico se divide entre crear el conocimiento e impartirlo. En esto se nota también el equilibrio y la dedicación que caracterizan su carrera. Ha dedicado aproximadamente 25 años a la docencia en licenciatura y otros 25 al posgrado, y en conjunto ha impartido aproximadamente cien cursos que van desde la Física del primer semestre hasta los temas selectos más especializados del posgrado. Por dieciséis años estuvo a cargo del Programa de Formación de Físicos Nucleares, o el "Paquete de Física Nuclear", primero en el ININ y después en el Instituto de

Física. Él está convencido, y así se los dice a sus alumnos, de que un físico tiene que estar aprendiendo continuamente y de que la mejor manera de hacerlo es dando clases. También, de que la mejor manera de formar gente y hacer investigación es hacer de las dos tareas una sola: hacer investigación con los estudiantes de grado.

Ha dirigido nueve tesis de doctorado, cuatro de maestría y doce de licenciatura. El interés personal, la generosidad con el tiempo y el esfuerzo que dedica a cada alumno, hace que muchos de ellos lo consideren no sólo como un muy respetado maestro, sino como un amigo. Es común que colegas jóvenes y viejos vayan a preguntarle de diversas cuestiones de física en general, ya que es bien sabida la vastedad de su conocimiento. Ha tenido siempre un interés activo en que las mujeres participen más de la actividad científica del país, y la mejor prueba de ello es que casi la mitad de sus estudiantes y sus colaboradores son mujeres.

Como en toda carrera científica completa, ha dictado innumerables conferencias y seminarios, asistido y presentado trabajos en congresos por invitación, organizado eventos internacionales y nacionales, escrito libros de su especialidad y ensayos de difusión de la ciencia, representado a México en varias delegaciones internacionales y tenido varios cargos académico-administrativos. Toda esta labor se ha visto reconocida en varios premios y distinciones, entre los que destacan: el Premio Ignacio Manuel Altamirano (1957), la vicepresidencia de la Sociedad Mexicana de Física (1975-1977), el Premio al Mérito Universitario (1979 y 1989), la preseña José Antonio Alzate (1983), ser miembro de la Junta de Gobierno del Colegio Mexiquense (1986-1996), ser miembro honorario de la Sociedad Matemática Mexicana (1993), y la Medalla de la División de Partículas y Campos-SMF (2001).

La calidad, originalidad, diversidad y el éxito de su trabajo de investigación, así como su dedicación y esfuerzo en la docencia, lo confirman como un "Forjador de la ciencia en la UNAM" y en el país, y como un ejemplo a seguir. Además, confirman lo que es otro de sus dichos favoritos: todo trabajo rinde frutos.

página 46

blanca

Ciclo de conferencias «Mi vida en la ciencia»

<i>Fecha</i>	<i>Investigador</i>	<i>Dependencia</i>
20 de Mayo	Dr. Marcos Moshinsky Borodiansky	Instituto de Física
21 de Mayo	Dr. Julián Adem Chahín	Centro de Ciencias de la Atmósfera
22 de Mayo	Dr. Teófilo Herrera Suárez	Instituto de Biología
27 de Mayo	Dr. Fernando Alba Andrade	Instituto de Física
28 de Mayo	Dr. Gonzalo Zubieta Russi	Instituto de Matemáticas
29 de Mayo	Dr. Alfonso Escobar Izquierdo	Instituto de Investigaciones Biomédicas
3 de Junio	Dra. María Teresa Gutiérrez Vázquez	Instituto de Geografía
4 de Junio	Dr. Emilio Lluís Riera	Instituto de Matemáticas
5 de Junio	Dr. Arcadio Poveda Ricalde	Instituto de Astronomía
10 de Junio	Dr. Carlos Guzmán Flores	Instituto de Investigaciones Biomédicas
11 de Junio	Dr. Juan Manuel Lozano Mejía	Instituto de Física
12 de Junio	Dr. Humberto Cárdenas Trigos	Instituto de Matemáticas
17 de Junio	Dr. José Negrete Martínez	Instituto de Investigaciones Biomédicas
18 de Junio	Dr. Zoltan de Cserna-de Gömbös	Instituto de Geología
19 de Junio	Dr. Fernando Walls Armijo	Instituto de Química
24 de Junio	Dr. Alfonso Mondragón Ballesteros	Instituto de Física
25 de Junio	Dr. Alfonso Romo de Vivar Romo	Instituto de Química
26 de Junio	Dr. Eucario López Ochoterena	Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
1 de Julio	Dr. Barbarín Arreguín Lozano	Instituto de Química
3 de Julio	Dra. Gloria Alencáster Ybarra	Instituto de Geología
8 de Julio	Dr. Luis Estrada Martínez	Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico
9 de Julio	Dr. Fernando Enrique Prieto Calderón	Instituto de Física
15 de Julio	Dr. Armando Gómez Puyou	Instituto de Fisiología Celular
16 de Julio	Dr. Ismael Herrera Revilla	Instituto de Geofísica
17 de Julio	Dr. Jaime Mora Celis	Centro de Investigación sobre Fijación del Nitrógeno
13 de Agosto	Dr. Luis de la Peña Auerbach	Instituto de Física
14 de Agosto	Dr. Agustín Ayala Castañares	Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
19 de Agosto	Dr. Jorge Rickards Campbell	Instituto de Física
20 de Agosto	Dra. Guillermina Yankelevich Nedvedovich	Instituto de Investigaciones Biomédicas

Lugar: Sala del Consejo Técnico de la Investigación Científica, 18:00 horas.

Son también «Forjadores de la Ciencia en la UNAM» el Ing. Marcos Mazari Méner, del Instituto de Física, y el Dr. Tirso Ríos Castillo, del Instituto de Química.

«Forjadores de la ciencia en la UNAM: Alfonso Mondragón Ballesteros»

se terminó de imprimir en junio de 2003

en los talleres de Formación Gráfica, S.A. de C.V.,

Matamoros 112, Col. Raúl Romero, C.P. 57630,

Cd. Nezahualcóyotl, Estado de México.

Se tiraron 300 ejemplares más sobrantes para reposición.

El cuidado de la edición estuvo a cargo de

Augusto A. García Rubio Granados,

Secretario Técnico de Publicaciones y Ediciones.