

54 AÑOS COMO FÍSICO

Palabras clave: Física de la Información; problema cuántico de muchos cuerpos.
Key words: Physics of Information; Many body quantum problem.

■ Angel Luis Plastino

CONICET & UNLP

plastino@fisica.unlp.edu.ar

■ 1. INFANCIA Y ADOLESCENCIA

Tal vez el rasgo más distintivo de niñez sea el haber comenzado a leer a muy temprana edad, dos años, al menos, antes de ingresar a la escuela primaria. Cuando lo hice, ya había leído bastante, incluyendo todos los libros infantiles de Constancio C. Vigil, de la Editorial Atlántica, y clásicos como La Isla del Tesoro y Robinson Crusoe. A los 8 años me traje de la casa de uno de mis abuelos una Enciclopedia antigua, de la 2ª. Década del siglo XX, que devoré con entusiasmo y releí en muchas ocasiones. Dado que por esas épocas mi memoria era casi perfecta, pude, como consecuencia, navegar con facilidad extrema toda mi educación pre-universitaria, sin haber tenido que estudiar mucho casi nunca, con una gloriosa excepción, de la que hablaré más adelante.

A edad también algo prematura adquirí la gran pasión de mi vida, el Jazz (escucho al escribir esto a un gran pianista del género), gracias a un tío que tocaba piano de oído. También a los 8 años entré en contacto con un disco del sexteto de Benny Goodman que me dio vuelta la cabeza. Desde entonces no hay casi día en que no escuche o toque algo de Jazz. En esa crítica edad comencé a estudiar libros de ajedrez que encontré en la biblioteca pater-

na y conseguí casi inmediatamente vencer con facilidad a todos los miembros de mi familia que practicaban el juego ciencia.

Mi familia era numerosa y los almuerzos dominicales multitudinarios. Todos eran radicales e hinchas de Gimnasia y Esgrima, lo que marcó mis rumbos en forma indeleble. Sería Ingeniero de la UNLP, como mi padre, militaría en la Federación Universitaria de La Plata, también como él, me afiliaría a la UCR a la edad apropiada y cargaría toda la vida con la pesada carga de sufrir como hinchas de Gimnasia. Si bien, con la excepción de un tío que era "puntero" del Dr. Balbín, nadie en la familia era activo militante, se hablaba mucho de política y desde los 6 o 7 años mi padre me llevaba a los pocos actos públicos que se permitían por esos años a la oposición (década de los 40), que generalmente tenían lugar en la Plaza Rocha de La Plata, a unos cientos de metros de mi casa.

Hice la Primaria en la Escuela que tiene la UNLP y entre mis compañeros había unos pocos interesados en la política, radicales y conservadores, con los que sosteníamos intensos debates a partir de los 10 años. Recuerdo mucho a uno de ellos que tenía un retrato del General Uriburu en su dormitorio. Ya en

el Secundario (Colegio Nacional de la UNLP) la cosa se hizo más intensa. Varios compañeros eran correligionarios y estábamos en casi iguales proporciones adheridos a los dos grandes subgrupos que componían la Interna radical de esos años, de modo que nuestras discusiones eran bastante entretenidas.

En el Nacional encontré también compañeros que compartían mi pasión por el Jazz, acompañada por el debate entre las dos "escuelas" de ese momento: Hot Jazz o Be-Bop, estando yo mucho más cerca de la 2ª, ¡hasta hoy!, sin que deje de agradarme mucho el Jazz tradicional. Promediando el Nacional, Piazzolla formó su célebre Octeto que me fascinó. Con él ingresé al maravilloso mundo del Tango y a las interminables polémicas entre los pocos "Piazzolistas" y el resto del mundo tanguero. En los años del secundario ejecutaba el clarinete y formaba parte de una bandita que tocaba dónde y cuándo podía. Fueron momentos maravillosos que recuerdo con gran nostalgia. El clarinete demanda mucho esfuerzo y es una adicción formidable que se cobra muchísimo tiempo.

En el año 1954, a mis 14 años, sucedió algo que cambiaría mi vida (y la de muchos jóvenes de ese entonces). Apareció en Argentina la

primera revista de Ciencia Ficción (CF), "Más Allá", que se constituyó en mi portal de entrada al mundo de la Ciencia. No sólo pude leer a los hoy llamados "cuatro grandes" escritores clásicos: Arthur C. Clarke, Isaac Asimov, Ray Bradbury y Robert A. Heinlein, sino también empezar a entusiasarme con los artículos de divulgación científica, muy bien escritos y de buen nivel, que la revista publicaba en cada número. He seguido leyendo ávidamente este tipo de ficción toda la vida. Desde 1968 estoy suscripto a la más importante de las Revistas del género, *The Magazine of Fantasy and Science Fiction*, donde publicar es tan difícil como hacerlo en *Nature* o en *The New Yorker*. Por cierto, la mejor CF de hoy tiene poco que ver con la de mi adolescencia. Las ciencias sociales constituyen el núcleo.

Mi contacto con *Más Allá*, en particular en lo que hace a los personajes de las novelas y cuentos que en ese momento me resultaron más atractivos, me posibilitaron entrever un futuro no en la Ingeniería sino en la Física. Y aquí aparece justo la excepción a la facilidad de los estudios iniciales que mencioné arriba, al comenzar esta reseña. A fines del 54 decidí dar libre el tercer año, que contaba entre sus asignaturas, precisamente y por vez primera en el currículo, Física. Mi padre me advirtió que no podía estudiarla por mi cuenta, como al resto del material de tercer año y que debía acudir a un profesor particular. Rápidamente constaté que esto era verdaderamente así. Física no se podía simplemente "leer". Había que "entender", con cierto esfuerzo por cierto. La situación no era enteramente nueva para mí, porque lo mismo sucede con el Ajedrez, a cuya práctica activa me dediqué fuerte en los años de la Primaria (tengo alguna medalla en torneos infantiles) pero debí abandonar cuando empecé a tocar

Jazz (cuestión de tiempo). Un libro o una posición de Ajedrez se estudian también. Aprobé Física libre con 10 y confirmé que mis lecturas CF me estaban encaminando bien, pues el modo de encarar las cosas de la disciplina simplemente me resultaba apasionante.

■ 2. LA FACULTAD

A principios del 57 me inscribí en la Facultad de Ciencias Físico-matemáticas de la UNLP, que reunía a todas las Ingenierías junto a las carreras de Física y Matemáticas. El mismo día hice lo mismo en el Centro de Estudiantes de Ingeniería (CEILP) y comencé a participar en reuniones de Agrupación antes de que comenzaran las clases del Curso de Ingreso. Mi Agrupación incluía socialistas, anarquistas y radicales. Estaba en vigencia un viejo pacto de a-partidismo político, que databa desde 1932. Contábamos con Agrupaciones hermanas en Medicina, Derecho y Humanidades. Sin embargo, no conducíamos el CEILP desde hacía 7 años. Debuté formalmente como estudiante repartiendo panfletos en el 1er día del Curso de Ingreso. Hasta que me licencié, en 1961, el CEILP fue mi 2º hogar. Debe señalarse que ocupábamos una vieja casona de grandes dimensiones, propiedad nuestra (lo sigue siendo hoy), de modo que éramos relativamente independientes de los avatares políticos, puesto que, por ser propiedad privada, no se podría cerrar, como lo fueron varias veces todos los demás en La Plata, Buenos Aires, etc. Ese año ganamos las elecciones de Centro y me convertí en miembro de su Comisión Directiva, cuyos debates eran de gran altura en esos lejanos tiempos. Aprendí muchísimo sobre la dinámica de reuniones, lo que me sería útil años después.

En lo académico propiamente dicho la pasé muy bien. Éramos solo seis los estudiantes de Física versus 900 de Ingeniería y una sola alumna de Matemáticas con la que compartimos prácticamente todas las asignaturas de los primeros dos años. La separación vino recién en tercer año (1959), en que sólo tuvimos en común el curso de Variable Compleja. Nos iniciamos en la Teoría con Mecánica Clásica y las cosas comenzaron a tornarse fascinantes para mí. En otra vena, ese año abandoné definitivamente el clarinete. Los tiempos no daban y me resultaba claro que no era lo suficientemente bueno como para ganarme la vida como músico. 1960 me trajo grandes novedades. Ese año cursamos Mecánica Cuántica, temática que me permitiría ganarme la vida desde entonces. Recuperamos la conducción del CEILP, que habíamos perdido en 1959, y fui electo Presidente del mismo. Al terminar mi mandato pasé a ser Consejero estudiantil del C. Directivo por el período anual 61-62. Lo más importante fue iniciarme como investigador, pues era obligatorio un trabajo de Licenciatura. Consulté a nuestra Bibliotecaria a quien recuerdo siempre con mucho afecto. Ella me dijo que existían unos volúmenes que resumían los *Abstracts* de los *papers* de Física de cada año y que estaban disponibles allí. Al consultarlos noté que había un Profesor nuestro que aparecía regularmente: el Dr. Horacio E. Bosch, que fue nuestra elección junto a Francisco Krmpotic, para intentar la Tesis de Diploma. Por suerte nos aceptó y así ingresamos formalmente a la Física Nuclear de Bajas Energías. Finalmente, fui designado ayudante alumno en el mismo año, comenzando así mi carrera docente en los Laboratorios de Física I.

Terminando con éxito el trabajo de marras, ambos nos Licenciamos en 1961 e inmediatamente pusimos

nuestra mirada en la Tesis Doctoral. Se iniciaba la Era del Estado Sólido y Horacio había conseguido algunos de los primeros detectores que podían utilizarse para trabajar con radiación beta y gama. En Bosch y col. (1963), presentamos el primer trabajo de espectroscopía que utilizó tales detectores. La Presidencia del CEILP, que ejercía en paralelo, constituyó una enorme responsabilidad. Contábamos con una imprenta propia, bastante importante, que empleaba 13 operarios y una segunda casa, más una librería-papelería que tenía dos empleados. Durante mi presidencia llegó a ser la 2ª en ventas anuales de La Plata. Es decir, 15 familias dependían de nosotros. A todo esto se agregaba, lógicamente, la dinámica gremial. Recién cuando tuve ocasión de ser Rector de la UNLP afronté responsabilidades mayores a éstas. Fue una experiencia que me marcó a fuego.

Inmediatamente terminada la Licenciatura comenzamos con Francisco a trabajar en el Doctorado, siempre dirigidos por Horacio, a quien debemos gratitud eterna. Correlaciones angulares gama-gama y la determinación de coeficientes de conversión fueron nuestros temas. Conseguimos efectuar dos publicaciones, en *Nuclear Physics* (Elsevier) y una más en el *Journal de Physique*, y luego de muchas penurias y sofocones presentamos nuestras Tesis a fines de 1963. Terminaba la carrera y mi militancia estudiantil. Había que pensar en hacer un Post-Doc. Nuestra idea, con Francisco, era abandonar la Física Experimental y pasar a la Teórica.

■ 3. POST-DOC EN UCLA

Ambos obtuvimos sendas Becas de Conicet. Francisco decidió volver a sus lares natales en Zagreb, con Alaga, gran experto en decaimiento beta. Lo mío fue extremadamente

afortunado. Horacio había compartido oficina en Berkeley con el gran Steve Moszkowski, que había escrito nada menos que el artículo de teoría nuclear del *Hanbndbuch der Physik*.

Le escribí pidiéndole me permitiera trabajar con él e, increíblemente, me aceptó. Para mayor suerte, al llegar a Los Ángeles, a fines del 64, Steve no tenía alumnos de doctorado y sólo otro Post-Doc (Robert Arvieu, que se tornó gran amigo). Ello implicaba que recibí muchísima más atención de mi Director de la que sería normal en la mayoría de los casos, por parte de un personaje de tal envergadura.

De tal modo cayó en mis manos el proyecto que Steve considera aún hoy el más importante de su carrera. Se había comenzado a estudiar por esos años de manera microscópica la superconductividad nuclear. La interacción responsable se tomaba directamente de la física del estado sólido, como componente de corto alcance de la interacción nuclear y como largo alcance se colocaba una interacción ad-hoc cuadrupolar. La idea de Moszkowski fue apelar a factores estrictamente nucleares para dar cuenta de tal composición *corto-largo alcance* de la interacción residual nuclear. Dada la alta densidad del núcleo atómico, en el interior el *scattering* (dispersión) entre nucleones es elástico, debido al principio de Pauli. Sólo en la superficie nuclear dicho principio permite *scattering* inelástico. De tales consideraciones se puede modelar una interacción nuclear que sólo es finita si dos nucleones se encuentran en la misma locación en la superficie nuclear, interacción que fue bautizada como *Surface delta interaction* (SDI). Las componentes de corto y largo alcance aparecían así automáticamente. Mi misión era verificar cuán buena era esta idea comparando con datos experimen-

tales de espectros nucleares. ¡Y tuvimos mucha suerte! Los concomitantes resultados fueron excelentes y se publicaron en Plastino y col. (1966) que resultó ser un artículo muy leído y referenciado. Además tuve la oportunidad de presentarlo en el Encuentro de Primavera de la *American Physical Society* en abril de 1966 en Washington, D. C. Un segundo trabajo sobre parecida temática fue publicado en Yucker y col. (1967).

UCLA me permitió un retorno al mundo del ajedrez. Su *Student Union* tenía un magnífico edificio de varios pisos y, en la planta baja, una sala de ajedrez con numerosos tableros. Ésta estaba siempre muy concurrida. Muchos jugando, otros mirando y mucha charla política. Un ambiente irresistible para mí. Para mi sorpresa, la mayoría sostenía posiciones muy de izquierda. Era la época de la guerra de Vietnam y de los Derechos Civiles de la gente de color. En el plano ajedrecístico recuperé bastante el nivel que había alcanzado a los 12 años y luego perdido. Dedicaba una horita casi diaria al juego e hice muchos amigos allí.

Robert Arvieu regresó a Francia a fines de 1965. Un nuevo Post-Doc de Steve entró ahora en escena, Amand Faessler, figura protagónica de mi carrera científica. Venía del sur de Alemania, de la Universidad de Freiburg, donde había realizado su Tesis Doctoral con Walter Greiner. Ellos habían trabajado mucho en núcleos deformados pesados (Tierras Raras y Transuránicos). Era natural aplicar a ellos la SDI. El tema resultó fructífero. Amand y yo pudimos publicar siete artículos, aceptados en el 66 e impresos en el 67, que fueron decisivos para el futuro de ambos. Él recibió una oferta de Profesorado en la Universidad de Muenster, en su país, y yo otra del Departamento de Física de la UNLP.

■ 4. DE VUELTA EN LA PLATA, VIAJE A ALEMANIA Y RETORNO

Me tocó dictar Mecánica Estadística en 1967-68, lo que a la larga tuvo un profundo impacto en mi carrera. En cuanto a investigación, las facilidades computacionales a mi alcance en la UNLP no me permitían continuar con análisis microscópicos nucleares. Ello me obligaba a cambiar de tema. Con Sara Abecasis juntamos esfuerzos y, con la ayuda de Horacio Bosch, nos pusimos a trabajar en el llamado Modelo de Davydov, el más avanzado de los modelos fenomenológicos nucleares. Publicamos tres artículos, el último de ellos [Plastino y col. (1969)], tal vez el más completo sobre el modelo. El libro de Física Nuclear de W. Greiner cita a los tres *papers*.

Amand Faessler me consiguió un cargo (equivalente a Profesor Adjunto) en su Universidad para el bienio 69-70. Conocer Europa constituyó una fantástica experiencia, especialmente porque el turismo no tenía aún las dimensiones que alcanzó luego. Por ejemplo, no se hacía cola para visitar la Torre Eiffel ni el Louvre ni la Capilla Sixtina. Fueron dos años maravillosos para mi familia. En lo científico trabajamos con Amand en extensiones nucleares del método auto-consistente de Hartree-Fock, con resultados bastante satisfactorios. Tuve la oportunidad de dar charlas en varias Universidades Europeas y sentir que mi nombre era relativamente familiar en el ámbito de la teoría nuclear continental. En este período me aceptaron ocho artículos más, de modo que me sentía, a los 30 años, muy orgulloso, con la inmodestia de la juventud.

A mi retorno, fui designado Profesor Titular de la flamante Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP, en el año 1971, construida quitándole a Ingeniería sus Departamentos de

Matemáticas y Física. Comenzaba para mí, auspiciosamente, una nueva era ignorando que se alumbraba una década trágica.

■ 5. LA DÉCADA DEL 70.

La UNLP había adquirido una computadora IBM lo suficientemente poderosa como para volver a pensar en desarrollos microscópicos con la *Surface Delta Interaction*, a lo que comencé a abocarme. Precisamente en ese momento apareció la que sería mi primer doctorando, la hoy Investigadora Superior del Conicet Susana Hernández, gran amiga desde esos lejanos tiempos. Nuestros esfuerzos tuvieron bastante éxito con numerosos resultados. Conseguimos publicar unos diez artículos en base a los que Susana escribió su Disertación Doctoral.

Mi "carrera" como Director de Tesis comenzó así de manera contundente. Le siguieron 28 Tesis Doctorales más para enriquecer mi acervo en este particular del que me siento particularmente orgulloso. Mis antiguos discípulos se hallan desparramados en distintos lugares del 1er y 3er mundo. Más importante, se han generado perdurables amistades con muchos de ellos. Cinco de estos ex-doctorandos permanecen en la UNLP. Incluso, con dos continúo trabajando hasta hoy.

En la década del 70 continué también colaborando con Amand Faessler, a quien visitaba regularmente en Juelich, pequeña ciudad del oeste alemán, en donde el equivalente germano a nuestra CONEA tiene un parque de investigación enorme, tanto en tamaño como en nivel científico. Otro hito de esa década fue mi asociación al ICTP de Trieste, a sugerencia de Amand. Ello me permitió integrarme a una nutrida comunidad de gentes que trabajaban en el Problema Cuántico de

Muchos Cuerpos, hacia el que comencé a orientarme.

El método de Hartree-Fock (HF) es una forma aproximada de las ecuaciones de la mecánica cuántica fermiónica, muy utilizada en física y en química. También se lo suele llamar método del campo auto-consistente. Esto se debe a que sus ecuaciones, basadas en orbitales mono-particulares, son más accesibles computacionalmente que los métodos basados en funciones de onda de muchas partículas. La aproximación HF es el equivalente, en física computacional, a la aproximación de orbitales moleculares de inmenso valor conceptual. Este esquema de cálculo es iterativo y computa la mejor solución (que consista en un único determinante de Slater) para la ecuación de Schroedinger independiente del tiempo. La interacción de un único fermión, en un sistema multi-fermiónico, con el resto de los fermiones del sistema, se aproxima promediándolo como una interacción entre dos cuerpos.

En Trieste, año 1975, tuve la fortuna de conocer a tres personas que resultarían grandes amigos y co-autores: Manuel de Llano (México, D.F.), Valdir Aguilera-Navarro (Sao Paulo) y Hank Miller (en ese momento en la Universidad de Frankfurt, trabajando con W. Greiner). Con Manuel comenzamos allí, a orillas del Adriático, a discutir la posibilidad de realizar cálculos Hartree-Fock en el límite termodinámico. En ese momento se creía que, en tal límite, las únicas posibles soluciones HF eran las ondas planas. El tema nos condujo a trabajar en lo que se llama materia nuclear. Se trata de un sistema idealizado de nucleones (protones y neutrones) interactuantes, que existe en varias fases no bien establecidas aún. No es la materia de un núcleo, sino una hipotética sustancia consistente en

un número gigantesco de protones y neutrones, en iguales proporciones, que interactúan entre sí solamente a través de la fuerza nuclear, sin interacción Coulombiana. Tanto el volumen como el número de partículas son infinitos, pero la densidad es finita. No hay efectos de superficie y si hay invariancia traslacional. Es un tema importante que predice detalles básicos sobre la interacción nuclear y es falsable.

El Profesor Albert Overhauser, de la Purdue University y ganador de la Medalla Nacional de Ciencia de 1994, había predicho la posibilidad de la existencia de ondas periódicas en la materia nuclear, generando gran controversia. Gracias a los buenos oficios de Jorge Flores, Director del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUMAM), pude realizar una estadía de tres meses en el IFUNAM a partir de enero de 1976, suceso que por fortuna se repitió varias veces, en años subsiguientes, para trabajar con Manuel y otros amigos como Rubén Barrera y Lutz Dohnert. El tema Overhauser nos intrigaba mucho. En de Llano y col. (1976a – 1976b) pudimos confirmar que la hipótesis de Overhauser tenía sólidos fundamentos y que habían infinitas soluciones de Hartree-Fock en el límite termodinámico, más allá de las ondas planas.

En Aguilera-Navarro y col. (1977) encontramos dos familias infinitas de orbitales de Overhauser generalizados (con dos parámetros), que explícitamente satisfacen, para estados ocupados, las ecuaciones de Hartree-Fock en el límite termodinámico. Para una interacción delta atractiva nos proveen de soluciones HF de más baja energía que la asociada a ondas planas, aún para acoplamientos débiles o para densidades bajas. Miembros de las familias que contienen infinitos armónicos

conducen a una red estática clásica a través de transiciones de 1° o 2° orden, según la familia.

Un efecto interesante pudimos detectar ese mismo año 1977. Un conjunto ortonormal de orbitales que explícitamente satisfacen las ecuaciones de HF para estados ocupados, acoplado a la interacción de Skyrme, predice clusterización alfa a bajas densidades en materia nuclear [Aguilera-Navarro y col. (1977b)]. Al respecto, Tony Hilton Royle Skyrme (1922-1987) fue un científico británico que modeló exitosamente la interacción efectiva entre nucleones inmersos en materia nuclear mediante un potencial de rango nulo, una idea que tuvo gran aceptación y es aún utilizada a la fecha en la ecuación de estado de estrellas de neutrones. Hoy hay consenso en que, a densidades nucleares normales, el modelaje con ondas planas es más estable que el de la clusterización alfa. Sin embargo, a densidades de alrededor de un tercio de la densidad nuclear central, se produce una transición a una fase cristalina de materia alfa. En la misma vena, este tipo de investigación se ha continuado en De Llano y col. (1978) y Barrera y col. (1978b).

En 1977 nos encontramos con la peculiar situación de que un grupito de físicos latinoamericanos estábamos trabajando juntos en temas de materia condensada y se nos ocurrió la idea de organizar un Workshop Latinoamericano sobre el tema. Además de Valdir, Manuel y yo, se sumó a la organización Rubén Barrera del IFUNAM. Los cuatro convocamos a tal reunión en ese mismo año, en el Instituto de Física Teórica de Sao Paulo, la que se desarrolló con toda felicidad, sin que tuviésemos la menor idea de que comenzaba algo que iba a perdurar hasta el 2014. Como asociado de Trieste, conseguí que el ICTP hospedara una 2ª Reu-

nión allí en Octubre de 1978. Tuvo una amplia repercusión y ya dejó de ser latinoamericana. Generosamente, los amigos de la CNEA me permitieron organizar en la sede de Avenida del Libertador una 3ª Reunión en 1979 y Lutz Dohnert realizó una 4ª en 1980 en la Universidad Central de Venezuela (Caracas). Ya éramos un grupo internacional grande y no hubo dificultad alguna en organizar la 5ª Conferencia en la UNAM. La siguiente tuvo lugar en Saint Louis, Missouri y la cosa siguió, año a año, en diversos sitios, recorriendo todos los continentes, hasta la fecha. Se trata de uno de los eventos anuales del mundo de la física más antiguos. En particular, se ha realizado en dos ocasiones en Mar del Plata y en otra en la Facultad de Derecho de la UBA.

El modelo de Lipkin es un modelo esquemático para entender la dinámica de sistemas interactivos de muchos fermiones, que obedece un álgebra $su(2)$. El término de interacción del concomitante Hamiltoniano se expresa en términos de una forma cuadrática con respecto a los operadores de creación y destrucción de los generadores $su(2)$. Fue propuesto en 1965 por los investigadores israelíes H. Lipkin, N. Meshkov y A. Glick y ha sido extensivamente utilizado para verificar diversos tipos de teorías de muchos cuerpos. En la década del 70 ingresé en esa clase de estudios. Como el modelo tiene solución exacta, aunque numérica, se hace sencillo testear diversas nóveles metodologías aproximadas para el problema cuántico de muchos cuerpos. En tal temática (Modelos exactamente solubles) trabajé muy fuerte durante varios años, siendo mi primera publicación Cambiaggio y col. (1978). María Cristina Cambiaggio era una física experimental del grupo de Horacio Bosch y una de las muchas víctimas de las purgas que se hicie-

ron en la UBA en los 70's, lo que la obligó a buscar lugar de trabajo en La Plata. Fue un placer colaborar fructíferamente con ella durante varios años. En nuestro primer trabajo inventamos el concepto de apareamiento de cuasi spin, un símil Lipkin del apareamiento que da lugar a la superconductividad que hereda todas las propiedades matemáticas del mismo. El nuevo tipo de apareamiento permite clasificar y utilizar fácilmente todos los multipletes del modelo de Lipkin. Antes se usaba únicamente el correspondiente al estado fundamental del modelo.

En el 78 coincidí con Steve Moszkowski en una visita al IFUNAM y diseñamos juntos una simplificación adicional del modelo de Lipkin, cuyas soluciones exactas son siempre de carácter analítico [Plastino y col. (1978).] Décadas después se ha empleado este modelo para estudiar transiciones de fase de diverso tipo, como las de *entanglement* [Plastino y col. (2010)]; Zander y col. (2009).

Otro tema que me interesó en la década que culminó en 1980 fue el llamado problema casero de Bethe (*Bethe homework problem*) propuesto por el Premio Nobel Hans Bethe, asesor científico del Presidente Eisenhower. El problema data de 1978. Se proponía que la parte repulsiva del llamado potencial de Reid, actuando en todas las ondas parciales relativas, se usase como interacción modelo para calcular las propiedades más importantes de un gas de neutrones. Obtuvimos algunos resultados muy interesantes [Cambaggio y col. (1980).] Este trabajo causó sensación cuando María Cristina lo presentó en el *Third Workshop on Condensed Matter Theories* y así se lo hizo notar en el informe efectuado a la *National Science Foundation* de EE.UU., que financió parte importante del evento.

En total, publiqué 53 artículos internacionales con referí en la década de los 70, sobre diversas problemáticas. Pero lo más importante es que esa década me generó un importante número de amigos para toda la vida. En lo que hace a mi actividad política, obviamente no hay mucho que decir. Los Comités radicales estuvieron cerrados mucho tiempo, aunque el partido continuó funcionando de diversos modos. En mi caso, formaba parte de un grupo de correligionarios que nos reuníamos en almuerzos celebrados en el Club Universitario de La Plata un par de veces por mes y, ocasionalmente, nos reuníamos con la Franja Morada local.

■ 6. PRIMER TRIENIO DE LOS 80

La década de mis 40 años comenzó auspiciosamente con la incorporación a mi grupo de cuatro tesis doctorales: Gastón Gutiérrez, Guillermo Bozzolo, Guillermo Zannoli y Josué Núñez. Como comento aparte, comienzo por entonces a trabajar en teoría de la información (GZ). GG se dedicó a mi línea de Materia Nuclear y GB-JN a Modelos exactamente solubles. En este período pude visitar dos veces el célebre *Los Alamos National Laboratory* de New Mexico (donde se diseñó la primera bomba atómica), cortesía de George Baker, asiduo participante de nuestro *Condensed Matter Workshop*. En Baker (1982) encontramos un resultado interesante, basado en la muy conocida expansión para bajas densidades del estado fundamental de un sistema fermiónico, donde la interacción es central. Pudimos desarrollar un esquema perturbativo en el que el estado de orden cero es el de un fluido de esferas repulsivas. Para un carozo duro más un potencial de pozo cuadrado y, usando determinantes de Padé, hallamos divergencias en la energía y presión correspondien-

tes a un empaquetamiento cerrado aleatorio a una densidad parecida al valor empírico para esferas duras clásicas.

Este trienio fue muy productivo para mí debido a cuanto se había agrandado mi grupo, lo que nos permitió agregar 36 publicaciones a mi CV. En enero-marzo del 83 hice mi última visita prolongada a Amand Faessler, que ahora estaba en la Universidad de Tuebingen, un lugar precioso del sur alemán. Además, en 1982 ascendí a Investigador Superior del CONICET y, a mediados de 1983, la Academia Nacional de Ciencias Exactas y Naturales me otorgó el Premio Teófilo Isnardi.

En el plano político las cosas se activaron bastante. Constituimos con mis amigos radicales la Fundación Eugenio Blanco, en homenaje al ministro de Economía del Presidente Arturo Illia y comenzamos a tener alguna presencia en la Capital Federal.

■ 7. MIS AÑOS POLÍTICOS: 1984-1992

El lunes 31 de octubre de 1983, tomando un café con un amigo de nuestra Fundación, comentamos nuestro temor a tener que abandonar nuestras profesiones para ocupar algún puesto político en el período democrático a iniciarse en Diciembre. La idea era ver si no podríamos "zafar", de algún modo. Imposible. Me ofrecieron la Presidencia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y me convenció la amenaza de saber quién iría si yo no aceptaba: alguien totalmente desvinculado de la Ciencia Básica. No la mejor motivación, ciertamente.

El 16-12-83 el flamante Gobernador Alejandro Armendáriz me puso en funciones en el tradicional edifi-

cio de la CIC y comenzaron cuatro años realmente intensos para mí. Por cierto, tuve una ventaja que ningún antecesor o sucesor (hasta ahora) en la Presidencia CIC había disfrutado. Directa o indirectamente conocía a todos los miembros del Gabinete Provincial. El Secretario General de la Gobernación, con despacho vecino al del Gobernador, había sido compañero de Agrupación en mis años estudiantiles y me tuteaba con varios diputados y senadores.

Era mi convicción que lo único que el Mundo Científico necesita, en un país del tercer mundo, es simplemente dinero. Los científicos saben mejor que nadie cuáles son las prioridades y no necesitan que algún político venga a darles lecciones en este sentido. Lo difícil es encontrar estrategias recaudadoras. Para gran suerte, el ministro de economía de la Provincia, el Dr. Osvaldo Benigno Palacios era (es) una persona muy lúcida y extremadamente culta. Entendió muy bien el dilema de la CIC y lo resolvió satisfactoriamente. Cuadruplicó su presupuesto, con el compromiso de dedicar 50% a la ciencia básica y el resto a desarrollos tecnológicos y extensión. Se pudo de esta manera ampliar considerablemente la planta de Investigadores CIC y el número de Becas y Subsidios. Uno de mis mayores orgullos es haber podido repatriar al Doctor Carlos Bollini como Investigador Superior de la CIC. Debo señalar que el Presidente de la Junta de Calificaciones fue en esos 4 años el Premio Nobel Luis Federico Leloir.

Durante mi primera semana en la CIC escribí una carta a los entonces 126 Intendentes poniendo la Institución a su servicio como asesora tecnológica, que financiaría en lo posible los problemas a afrontar en ese sentido con un Plan de Asistencia a Municipios. Tal plan tuvo mucha aceptación en los Municipios del

Interior bonaerense, cuyos alcaldes rutinariamente incluían a la CIC en su circuito cuando debían bajar a La Plata.

Se acometieron decenas de Proyectos a pedido de los Intendentes y se instituyó un protocolo para que el Directorio los estudiase y eventualmente aprobase. Por cierto, después de tantos años mi memoria es borrosa en detalles, pero recuerdo como nuestro emprendimiento más ambicioso el diseño de una nueva escuela para el Puerto de Quequén, a cargo del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, que costó la décima parte de lo que varias consultoras internacionales habían presupuestado. En el tema hidráulico menciono asimismo asistencia a varios Municipios por el tema inundaciones. Antropólogos del Museo de la UNLP asistieron a una municipalidad del interior en el tema de instalación de un nuevo cementerio, tema que no puede llevarse a cabo a la ligera. Me impresionó vivamente un llamado del Intendente de Tres Arroyos por una invasión de mosquitos resistentes a los insecticidas. El problema fue rápidamente solucionado con una visita de entomólogos de nuestro Museo, pero lo significativo es que la primera reacción del alcalde hubiera sido llamarme. Comenzamos varios programas de investigación clínica bajo la inspiración del Profesor Horacio Cingolani, también Investigador Superior de CONICET. Debo señalar que se constituyó una Red integrada por la CIC y las entonces 5 Universidades Nacionales con sede en Buenos Aires a fin de aprovechar al máximo el potencial instalado en la Provincia. Realmente, mis 4 años de CIC fueron felices y me dejaron gratos recuerdos.

A fines de 1985 recibí una visita de los directivos platenses de Franja Morada en mi oficina del Departamento de Física.

Querían postularme para la Presidencia (Rectorado) de la UNLP. Se estaba terminando el período de normalización universitaria encarado por el Presidente Alfonsín desde diciembre del 83 y en el 86 se iba a elegir, por primera vez en veinte años, un Presidente surgido de la voluntad de los Claustros y no del "dedo" del Presidente de la Nación. La oferta me sorprendió profundamente, pues era algo que jamás me había imaginado y la sorpresa no era muy agradable. Mi gestión en la CIC convivía fácilmente con mi labor como investigador, sin interferencias importantes. Pero dirigir la Universidad eran palabras mayores y mi vida se trastocaría totalmente. El argumento de la Franja era sin embargo que, según sus encuestas, yo era el único candidato radical que podía conquistar la mayoría de la Asamblea Universitaria y que una derrota en La Plata tendría trascendencia en ámbitos mayores que el platense. Evidentemente, habiendo militado en la UCR desde la adolescencia, no podía rehusarme ahora.

La campaña electoral fue muy trajinada. Tuve que reunirme y presentar mis propuestas a todos los electores de los tres claustros (Profesores, Graduados y Estudiantes) de las entonces trece Facultades de la UNLP, lo que suma 39 reuniones distintas, más muchas otras "mano a mano", más innumerables reuniones de estrategia con la Franja. Pero, en abril de 1986, la Asamblea Universitaria se reunió un sábado en el Salón de Actos del histórico Colegio Nacional y fui electo Presidente con bastante más de los 2/3 de los votos. Yo esperaba el debate y la votación en mi "boliche" del Instituto de Física, a unos 70 metros del lugar de la Asamblea, siguiendo por Radio Universidad todo el trámite. Allí me fue a buscar una especie de "guardia de honor" de la Franja para que saludase a la Asamblea como Presidente

Electo. Tal acompañamiento resultó absolutamente necesario, pues fui recibido con una lluvia de piedras provenientes de grupos ultra, que también me esperaban enardecidos en la puerta del Colegio. Sin mi "guardia" pude haber sido seriamente lastimado (o peor). ¡Tal mi primera experiencia Rectoral! Ello no empañó demasiado la solemnidad del momento ni mi profunda emoción al poder dirigirme a mis votantes desde el escenario del Salón, inaugurando el retorno de la democracia y autonomía universitarias luego de 20 años de intervención de nuestra casa de altos estudios por el Poder Ejecutivo Nacional. El presidente Alfonsín me puso en funciones el 1° de junio de 1986 en el Aula Magna de nuestra Facultad de Medicina en un acto altamente emotivo y comenzaron así los seis años más duros, intensos y dificultosos de mi vida.

Tratar de describir esos años con cierto detalle necesitaría de un libro (que no pienso escribir). Me limitaré pues a una muy somera elaboración. Para peor, desde junio del 86 hasta enero del 88 detenté una Presidencia doble: CIC y Universidad pues, por una larga serie de motivos de diversa índole, resultó impracticable que renunciase a la CIC. Para tratar de dar una idea de lo que significa ser Rector relato algo que sucedió en mi primera jornada laboral. En la pila de correspondencia acumulada, la mayor parte felicitaciones y buenos deseos, había una notificación de IOMA, la obra social de la Provincia de Buenos Aires que también atendía a nuestros docentes y no docentes. Me comunicaban que denunciaban el Convenio que nos ligaba. Casi me infarto. Recién llegado, se quedaba sin cobertura médica toda nuestra gente. Por supuesto, pude solucionar esto en un par de días, con la colaboración de las Autoridades de esta obra social. Pero

el shock adrenalínico fue tremendo. Si bien no en tamaña magnitud, el exceso de stress y adrenalina era cotidiano. Cuando era niño escuchaba un famoso programa de radio de esas épocas: los Pérez García, cuyo lema era *todos los días un nuevo problema, todos los días una nueva emoción*. Pues ésa era la constante diaria. Arribaba cada mañana a mi hermoso e histórico despacho, que ocupó en su momento el Fundador de la UNLP: Joaquín V. González, con la certeza de que un nuevo descalabro acechaba.

Sólo abordaré un par de temas relativos a mi gestión. En primer lugar, desde 1966 la Universidad fue regida por autócratas designados por el PEN a los que nadie supervisaba. Hacían y deshacían a su antojo. Ello generó un desorden normativo espectacular. Era imprescindible racionalizar y unificar la normativa universitaria, tarea que, acometida entusiastamente por los 52 integrantes del Consejo Superior, estaba lejos de ser sencilla. Pero se logró consensuar casi por unanimidad tras varios meses de trabajo. Por ejemplo, una consecuencia fue tener un reglamento de Postgrado uniforme con los mismos requisitos formales para ser Doctor en Medicina o en Astronomía. Otro tema central fue el de consensuar que la tarea básica de la Universidad es crear conocimiento y que todas las demás misiones derivan de esta creación. La Universidad debe, en buena medida, enseñar el conocimiento que ella misma genera, sea éste el de un cirujano exitoso, un jurista famoso o un químico de excelencia. Este discurso fue llevado al Consejo de Rectores (CIN), creado en 1984, ámbito en el que tuvo favorable recepción. Como apunte importante para mí, dejo constancia de que en 1987, a instancias de la Prof. S. Hernández, fui designado Profesor Honorario de la UBA.

Cuando se agotaba mi mandato, en 1989, se volvió a plantear casi la misma situación que en 1983, ahora aguzada porque el radicalismo había perdido la Provincia de Buenos Aires. Ya no sólo la Franja, sino la militancia en general, consideraban que era muy arriesgado cambiar de caballo en medio del río y que debía postularme a la única reelección que los Estatutos permitían, aunque eso requiriese obtener 2/3 de la Asamblea en primera votación. Tal cosa sucedió, exitosamente, sobrando algún voto y mi mandato fue extendido hasta junio de 1992. Hay una estrecha y tradicional vinculación entre la UNLP y el Gobierno provincial que ahora ya no era de mi Partido. Debo señalar con agradecimiento la gran colaboración y ayuda personal del Gobernador A. Cafiero en la segunda parte de mi gestión. Vale la pena mencionar una anécdota ilustrativa, entre muchas otras. Habíamos conseguido un subsidio muy importante de uno de los Estados Federales alemanes para crear una Escuela de Postgrado de Marketing Internacional, que funcionaría en la Facultad de Ciencias Económicas. Estaba todo acordado pero hacía falta un último detalle formal adicional: una carta de nuestro Gobernador a su par alemán, en la que se solicitase el envío de los concomitantes fondos. Yo no la podía escribir, pues no era par de un Gobernador. Debí pues telefonar al Dr. Cafiero para explicarle el problema y pedir ayuda. Al cabo de un par de minutos, el Dr. Cafiero me interrumpe para decirme que entendía perfectamente y que le enviara con un ordenanza a la Gobernación (5 cuadras del rectorado), el texto en alemán que él debía firmar. 45 minutos después tenía la solicitud ya firmada en mi despacho. La Escuela fue creada y sigue funcionando hasta el día de hoy.

El 1º de junio de 1992 fue uno de los días más felices de mi vida, pues pude poner en funciones a mi sucesor, el Ing. Luis Lima, en cuya elección había trabajado fuertemente. No fue fácil. Hubo dos candidatos radicales. Lima era Miembro de la Academia Nacional de Ciencias Exactas y Naturales y el otro no. Mi opción resultaba obvia. La Franja votó dividida y se ganó en segunda votación por meros dos votos. El lento escrutinio me hizo sufrir agónicos espasmos, aún en los minutos finales de mi mandato. Los temores de la Franja, que habían motivado mis dos postulaciones previas a la Asamblea Universitaria, quedaban confirmados plenamente. Mi "acto" de despedida como ex rector, luego de la toma de posesión del nuevo, recordando el famoso tango, fue tomar un último café antes de abandonar definitivamente, con gran alegría, el despacho del Fundador de la UNLP.

¿Abandoné la investigación durante mi gestión? Pues no. Tenía varios Becarios a los que no podía abandonar. Mi Secretaria personal, la Sra. Elsa Vibbot, clausuraba todos los accesos a mi despacho cuando algún Becario entraba a él y podíamos trabajar con toda tranquilidad. En mi período rectoral 1986-1992 publiqué 53 artículos internacionales y varios Tesistas míos se recibieron. Estos 53 *papers* seguramente ayudaron para que en 1993 se me concediera el Premio Konex de Platino en mi especialidad, distinción que se otorga cada 10 años. Además, durante los tres últimos años de gestión dicté Mecánica Cuántica 1, pues temí que no dar clases durante 6 años podría inhabilitarme (bloquearme) psicológicamente en el futuro.

Tengo sentimientos encontrados respecto a mis 6 años como Rector: por una parte, visité lugares y cono-

cí personajes interesantísimos a los que no hubiera tenido acceso de otra manera y aprendí mucho sobre "cómo" funcionan, en realidad, las cosas y los seres humanos. Pero, del lado negativo, viví angustias, dramas y desazones tremendas y casi continuas. Durante alrededor de un año, a partir de junio del 92, sufrí de pesadillas en las que volvía a ser Presidente de la UNLP. Debo confesar, empero, que siento mucho orgullo por los logros que se alcanzaron de los que aún hoy recibo reconocimientos diversos.

■ 8. FÍSICA DE LA INFORMACIÓN

Si bien he trabajado en diversas áreas de la Física, comenzando con la nuclear experimental de bajas energías y pasando muchos años dedicado al problema cuántico de muchos cuerpos, es justo aseverar que diversos análisis en Física de la Información (entrópicos) constituyen el cuerpo principal de mi obra a partir de la finalización de mi mandato rectoral.

Para un físico teórico, el concepto de entropía S viene ligado mayormente a *una medida del desorden microscópico de un sistema*. Desde un punto de vista fenomenológico, por supuesto, S está asociado a la porción de la energía total E disponible para realizar trabajo útil (energía libre F) mediante la relación $F=E-TS$, donde T es la temperatura. En teoría de la Información, S es una medida de la ignorancia del observador respecto de los detalles estructurales del sistema. Adicionalmente, S es la base de un método de inferencia utilizado en diversas disciplinas, el Principio de Máxima Entropía, abreviado comúnmente como *MaxEnt*, y considerado por muchos como el más poderoso en el mundo científico. El pequeño listado de interpretaciones entrópicas aquí reseñado

puede ser enriquecido con muchas otras más. Con lo dicho basta para darse una idea de que el de S es uno de los conceptos más complejos de la ciencia, al que, como he señalado, he dedicado parte importante de mi tarea como investigador.

Mi primera "incursión entrópica" se dio en 1981, en colaboración con dos grandes amigos de la CNEA, Araceli Proto y Dino Otero. Atacamos de este modo el problema de la fisión fría [Otero y col. (1981)], Nuestro nuevo resultado fue la determinación del estadio final del proceso de fisión fría, con una distribución (*fission mass-yield*) de máxima entropía, constreñida por el número de masa (A), que explicaba perfectamente los resultados experimentales en 15 casos. Con Araceli y Dino más Guillermo Zannoli encontramos poco después otra faceta de la entropía, a saber, su utilidad como constante de movimiento para el estudio de problemas dinámicos [Otero y col. (1981)]. Pudimos establecer, vía el formalismo de la teoría de la información, una conexión explícita entre S y el teorema de Ehrenfest. Tal ligazón arroja una prescripción muy útil para describir la evolución temporal de observables físicos, que hemos utilizado en distintos escenarios desde entonces. Nuestra última aventura al respecto fue realizada con Claudia Sarris (ex Tesista de Ara) y ella misma [Sarris y col. (2013)], mi último trabajo con Araceli, aceptado con posterioridad a su prematuro y tan lamentado fallecimiento. La teoría de la información (TI) provee herramientas que configuran un nuevo paradigma para la ciencia. Siguiendo el famoso dicho de Feynman (1948): *there is a pleasure in recognizing old things from a new point of view*, este placer puede volverse realmente intoxicante y me ha motivado muy fuertemente a intentar reformular diversas teorías desde el modo TI.

Es conveniente hacer aquí referencia a J. A. Wheeler, pionero en el campo de la cosmología cuántica (y en muchos otros también), con el desarrollo, en colaboración con B. DeWitt, de la ecuación que lleva sus dos nombres, que determina la comúnmente llamada *wave function of the Universe*. En 1990, Wheeler sugirió que la información es fundamental en la física del Universo. De acuerdo a su célebre *it from bit* doctrina, *all things physical are information-theoretic in origin*. En otras palabras, todo *it*, cada partícula, campo de fuerza y aún el espacio-tiempo, derivan su función, su significado, su misma existencia, a partir de la respuesta de dispositivos empíricos capaces de responder a preguntas cuyos resultados son un SÍ o un NO. Es decir, hablamos de posibilidades binarias, o bits. La frase *it from bit* simboliza la idea de que cada ítem del mundo físico admite su interpretación más profunda en términos informacionales. Lo que llamamos realidad emergería, en última instancia, de efectuar y registrar SI-No preguntas referidas a equipamiento experimental apropiado. Wheeler (1990) resume estas ideas afirmando que el nuestro es un universo participativo.

Las oraciones anteriores tratan de resumir brevemente lo que se denomina **Paradigma de Wheeler**, que si bien es aún minoritario hoy, cuenta con formidables apoyos, como el del Premio Nobel Gell-Mann y el del Santa Fe Institute, New Mexico. Asociado al paradigma encontramos también al llamado Programa de Wheeler, que pretende derivar todas las leyes de la física desde la teoría de la información. Si bien simpatizo con el paradigma, no puedo aseverar que me identifiqué plenamente con el mismo. En cambio es justo decir que mucho de mi trabajo se enmarca en el Programa. Debe mencionarse que éste acumula éxitos significati-

vos. Por ejemplo, dos grandes amigos míos, Roy Frieden (University of Arizona) y Bernie Soffer (UCLA), han podido re-derivar ya, a partir de él, utilizando Teoría de Juegos, las ecuaciones de la mecánica clásica, del electro-magnetismo, las de Dirac y Klein-Gordon, las de la Relatividad General, etc. Por cierto, el primer gran paso en este programa fue dado mucho antes por E. T. Jaynes (Washington University, St. Louis, Missouri), en 1957 [ver el excelente libro de Amnon Katz (1957)]. Jaynes reformuló la mecánica estadística, basándola enteramente en el concepto de información (medida logarítmica de Shannon), mostrando la equivalencia entre esta medida y la entropía termodinámica. En particular, inventó el Principio de Máxima Entropía (*MaxEnt*) y mostró elegantemente como reconstruir el formalismo termodinámico, asignando carácter físico a los concomitantes multiplicadores de Lagrange, que resultaron ser la temperatura, la presión, el potencial químico, etc.

Como ya dijimos, Jaynes reformuló en 1957 la mecánica estadística (ME) sobre la base de la teoría de la información, con la mecánica cuántica como telón de fondo, en tanto que la teoría de Gibbs, *primera formalización axiomática de la ME* (1902), y única hasta Jaynes, tiene como tal a la mecánica clásica. En vez de los cuatro postulados, referidos al espacio de las fases, requeridos por Gibbs, Jaynes sólo usa dos. El básico dice que el operador densidad que describe un dado sistema es el determinado por el principio *MaxEnt*. Un segundo axioma asevera que este operador depende explícitamente sólo de valores de expectación disponibles e, implícitamente, de algún Hamiltoniano. No hacen falta referencias a idénticas *a priori* probabilidades ni al concepto de equilibrio. Equilibrio es el estado de cosas en el que el conocimiento

a priori necesario para dar una descripción satisfactoria del sistema se refiere únicamente a constantes de movimiento. Desde el punto de vista de la navaja de Ockham, Jaynes necesita menos postulados y conceptos que Gibbs, por lo que su teoría tiene mayor alcance.

Pasemos ahora a un tema central. El principio *MaxEnt* establece que *la distribución probabilística menos sesgada (o prejuiciosa) que se le puede atribuir a un sistema estadístico es aquella en la que, dadas unas ciertas condiciones fijas, se maximiza la entropía*, esto es, aquella en la que la desinformación (ignorancia) es máxima. En una situación de información parcial la distribución estadística menos sesgada será aquella que menos información extrínseca al problema contenga. El principio implica que 1) dada la entropía como una funcional de la distribución probabilística y 2) las condiciones intrínsecas al problema que reflejan nuestro conocimiento acerca del mismo, 3) la distribución menos sesgada cumplirá un principio variacional $\delta S=0$, al que se le añaden ciertas restricciones, vía multiplicadores de Lagrange, que definen nuestro saber a-priori. Este principio de inferencia es a menudo considerado el más poderoso de la ciencia. En muchos de mis trabajos me he abocado al análisis de este principio con dos variaciones esenciales, a saber (1) eliminar la palabra "estadística" como adjetivo del sustantivo "sistema" y (2) generalizar lo que se entiende por "entropía".

La Teoría de la Información (TI) asigna a cada distribución probabilística P una "ignorancia", o "falta de información", llamada entropía de Shannon (expresada en bits con logaritmos en base 2): $S = - \sum_i P \log_2 P$. Claude Shannon inventó la TI en 1948, creando así una nueva rama de las Matemáticas, en los laborato-

rios Bell. La medida de información se llama S para los físicos, pero H para los matemáticos e ingenieros. Es la cantidad de información que nos faltaría para llegar a la situación de información completa en la que una de las P_k vale uno y el resto se anula. Si todas las P_k son iguales (a $1/N$), estamos en la situación de máxima ignorancia (máxima entropía). ¿Por qué debiera uno maximizar la ignorancia, o entropía, sujeto a las restricciones que surjan de la información disponible? Porque ello garantiza que en el proceso de inferencia uno utilice la verdad, toda la verdad (por ejemplo, valores medios conocidos) y *nada más que la verdad*. Maximizar la ignorancia garantiza que no se esté inventando información no disponible.

■ 9. ENTROPÍA CUÁNTICA

Supongamos ahora que P es el módulo cuadrado de una función de onda ψ . Le podemos asignar una entropía de Shannon (cambiando de unidades para usar los logaritmos naturales) como $S_Q = -2 \int dx |\psi|^2(x) \ln |\psi(x)|$. Esta integral no es, obviamente una entropía termodinámica. La denominaremos *entropía cuántica*. Es, empero, una legítima medida de información de Shannon. Trabajar con esta nueva medida es la idea central de la Tesis Doctoral de Norma Canosa (UNLP), que tuvo el honor de dirigir a fines de los 80's. Nuestro objetivo era averiguar hasta qué punto es posible obtener información de carácter cuántico sobre la base de disponer de algunos valores de expectación que emerjan de una función de onda dada ψ , *sin conocer* ψ , por supuesto, a fin de determinar esta función sin pasar por la ecuación de Schrödinger. Nuestro primer trabajo al respecto es Canosa et al (1989). Usábamos pues una novel versión del principio de máxima entropía aplicado a distribuciones asociadas a estados cuánticos es-

peciales. Esto nos permitió efectuar inferencias concernientes a la función de onda del estado fundamental a partir del conocimiento de unos pocos valores medios relevantes. El esquema se aplicó a potenciales anarmónicos y al de Morse, con excelente resultados. Más aún, encontramos que, en todos los casos en que ψ se puede obtener analíticamente, nuestra metodología proporcionaba la solución exacta. Por ejemplo, para el potencial de Coulomb basta conocer el valor medio de la inversa de r^2 .

El esquema fue luego extendido a sistemas de muchos cuerpos, conformándose un sistemático esquema de inferencia de la función de onda correspondiente a un estado fundamental sobre la base de información limitada, lo que ampliaba el rango de aplicaciones del principio de máxima entropía con vínculos variacionales. Los concomitantes resultados eran de mayor calidad que los arrojados por teorías de campo medio, aún incluyendo proyección (Projected Hartree-Fock). Y esto sucedía aún en regiones de transición donde HF puede tener problemas [Canosa y col. (1990)]. Examinamos después la posibilidad de avanzar con otros estados, los excitados. Para ello investigamos la posibilidad de inferir espectros de energía y sus concomitantes auto-estados sobre la base de información incompleta respecto del estado fundamental. Los resultados se publicaron en colaboración con Hank Miller, nosotros intentamos a continuación una aplicación estrictamente nuclear de las ideas arriba esbozadas, en el contexto de dos modelos nucleares distintos que incorporan el fenómeno de apareamiento (pairing) junto a interacciones multipolares. Conseguimos mejoras sustanciales respecto a la metodología standard (projected Hartree-Fock y BCS), especialmente en 1) regiones transicionales y 2) la

descripción de fluctuaciones de los observables relevantes. Obtuvimos también un tratamiento analítico en el límite termodinámico [Canosa y col. (1992)] El siguiente paso fue desarrollar una aproximación para describir las excitaciones colectivas de sistemas de muchos cuerpos fermiónicos, basada en estas ideas entrópicas. Volvimos a tener éxito y, en algunos escenarios, obtuvimos inclusive resultados exactos. En otros, nuestros resultados eran de mejor calidad que los arrojados por la célebre RPA [Canosa y col. (1992)]. Nuestro tratamiento permite mejorar la aproximación WKB y compete con el muy apreciado modelo de Gustzwiller en el modelo de Hubbard [Casas y col. (1993)]. Además, pseudo calores específicos, obtenidos como derivadas de la entropía cuántica (1) adquieren el rol de firmas de transiciones de fase [Arrachea y col. (1992)].

Vemos pues que obtenemos un éxito formidable con las funciones de onda obtenidas maximizando la entropía cuántica con vínculos, funciones que llamaremos *PME*, dado que ellas derivan del principio de máxima entropía y NO de resolver una ecuación de Schrödinger. ¿Por qué? Podemos aducir varias razones [ver Plastino et al (1993)]. La primera es que la entropía cuántica S_Q es, como ya se ha señalado, una legítima medida de información de Shannon. Consideremos N cajas. En una, y sólo una, de ellas hay escondido un objeto valioso con probabilidad P_i para la caja rotulada con el índice i . Nuestra ignorancia en este caso es dada por la medida logarítmica de Shannon, como la suma sobre i de la cantidad $(-P_i \ln P_i)$, que llamaremos por el momento J . Si ahora asociamos estas cajas con los kets $|i\rangle$ de una base ortonormal completa, entonces $P_i = |C_i|^2$, donde C_i es el coeficiente de la expansión de la función de onda deseada en la base

$|i\rangle$. Nuestro método de inferencia provee estas componentes en base a cierto grado de información a priori. Si esta información es la adecuada, necesariamente el proceso de inferencia debe proporcionar resultados apropiados.

La segunda razón es que se puede probar rigurosamente que la entropía cuántica posee un único máximo global (ver la última referencia citada). Más aún, y esta sería una tercera razón, se ha demostrado en la misma referencia que S_Q obedece un teorema H y (quinta razón) que la función de onda MEP satisface el teorema virial, como lo hace obviamente la función de onda exacta. Como es bien sabido, este teorema es una ecuación general que relaciona el valor medio de la energía cinética de un sistema con su energía potencial promedio. Ahora, sea H el operador Hamiltoniano y W otro operador hermítico cualquiera. Si Φ es una autofunción exacta de H , entonces ciertos valores de expectación respecto de ella obedecen lo que se llaman teoremas hiperviriales. Dado un operador W correspondiente a un observable arbitrario, todo auto-estado $|\Phi\rangle$ del Hamiltoniano verifica $\langle \Phi | [H, W] | \Phi \rangle = 0$. El grado de bondad de una aproximación a Φ puede apreciarse verificando que la función de onda aproximada satisfaga teoremas hiperviriales. Y, en la última referencia citada se demuestra que la función de onda MEP *lo hace para ciertos observables relevantes* W [Plastino y col. (1995)] Esta sería una razón adicional (6ª) que justifica utilizar el principio de máxima entropía cuántica. Finalmente, hemos verificado que, en muchos escenarios, minimizar la energía (la ecuación de Schrödinger surge de un principio variacional de este tipo) y maximizar S_Q resultan procedimientos equivalentes. Esto se entiende fácilmente. El módulo cuadrado de la función de

onda es una distribución probabilística (DP). Como toda DP, queda pues determinada por sus momentos. Algunos de éstos constituyen nuestra información a priori en el MEP. Si los elegimos sensatamente, necesariamente deben dar una buena aproximación a la DP de marras. Al aumentar el número de momentos a priori, naturalmente la función de onda MEP convergerá a la exacta. Nuestro trabajo en este rubro ha mostrado pues que en lugar de resolver exacta o aproximadamente la ecuación de Schrödinger uno puede trabajar equivalentemente con el principio de máxima entropía.

■ 10. ENTROPÍAS GENERALIZADAS S

La entropía generalizada, o entropía de Tsallis, S_q (¡ahora la q es minúscula!), es una generalización de la entropía de Shannon, introducida por mi gran amigo Constantino Tsallis (1988) En la Literatura, la relevancia física de esta entropía comenzó a cobrar importancia a partir de 1993. Un espectro cada vez mayor de sistemas complejos, naturales, artificiales y sociales se han identificado con la estadística generalizada construida a partir de S_q , con bien establecidas predicciones y consecuencias. Entre ellas podemos mencionar especialmente:

1. La distribución que caracteriza el movimiento de átomos fríos en redes ópticas disipativas, predicha en el 2003 y observada en 2006.
2. Las fluctuaciones del campo magnético en el viento solar.
3. La distribución de velocidad en plasmas granulares [plasmas que contienen, en suspensión, partículas cargadas de tamaño que va de los milímetros a los nanó-

metros. Tienen aplicación industrial]

4. Relajación de vidrios de spin.
5. Iones atrapados que interactúan con un gas clásico.
6. Colisiones de alta energía en los detectores LHC/CERN (CMS, ATLAS y ALICE) así como RHIC/Brookhaven (STAR and PHENIX).

Desde ya vale la pena destacar algunos resultados teóricos que clarifican las condiciones físicas para las que la estadística asociada a S_q de hace necesaria:

1. Difusión anómala.
2. Sensitividad a condiciones iniciales y producción de entropía en la frontera del caos.
3. Conjuntos probabilísticos que hacen la entropía de Tsallis, que NO es aditiva, extensiva sin embargo en el sentido termodinámico.
4. Termo-estadística del movimiento sobre-amortiguado de partículas interactuantes.
5. Generalizaciones no-lineales de las ecuaciones de Schrödinger, Klein-Gordon y Dirac.
6. Procesos irreversibles descritos por ecuaciones de difusión, Fokker-Planck, y reacción-difusión con términos difusivos no-lineales que involucran potencias de la densidad.
7. Descripción estadística de estados meta-estables de sis-

temas con interacciones de largo alcance.

8. Tratamiento estadístico de sistemas en equilibrio térmico con baños finitos.

Definimos, para una distribución probabilística normalizada discreta $\{p_i\}$ como:

$$S_q(p_i) = \frac{1}{q-1} \left(1 - \sum_i p_i^q \right),$$

donde q es un número real (llamado índice entrópico). Si $q=1$, S_1 se reduce a la entropía ordinaria de Shannon. En el caso continuo de una densidad de probabilidad tenemos una integral, por supuesto.

Dados dos sistemas estadísticamente independientes A y B , para los que

$$P_{km}(A,B) = P_k(A) P_m(B),$$

sucede que la entropía de S_q satisface la condición de suma Tsalliana

$$S_q(A, B) = S_q(A) + S_q(B) + (1 - q)S_q(A)S_q(B).$$

Es evidente que $1-q$ es una medida de no aditividad. ¿Por qué esta generalización es indispensable? Porque si extremizamos la medida de información de Shannon sujeta a vínculos obtendremos, SIEMPRE, una función exponencial. Ahora bien, muchas distribuciones en el mundo científico NO son exponenciales sino, por ejemplo, leyes de potencia.

Es oportuno hacer aquí algunas acotaciones personales sobre mi actividad en esta temática. Cobré conciencia de ella en una Conferencia celebrada en Puerto Rico a mediados de 1992, en un almuerzo con Constantino Tsallis. El había en ese momento publicado dos trabajos so-

bre el tema. Tal era la extensión de lo que con el tiempo se convertiría en una problemática con miles de autores y publicaciones. Me intrigó mucho el tema y Constantino prometió enviarme (¡por correo ordinario!) sus dos (ahora célebres) pioneros papers.

Al recibirlos tiempo después en La Plata, mi hijo (Ángel Ricardo) se interesó también, lo que motivó, que por primera vez en nuestras vidas, comenzáramos a colaborar científicamente. De esa cooperación surgió la primera aplicación física de la por ese entonces nueva estadística de Tsallis.

Diversos sistemas astrofísicos se modelan mediante configuraciones auto-gravitantes de fluidos que satisfacen una ecuación de estado efectiva dada por una ley de potencia

$$P = K\rho^{((n+1)/n)},$$

en donde ρ es la densidad y P la presión. Tal ecuación de estado se caracteriza mediante dos paráme-

tros, la constante politrópica K y el índice politrópico n . En el límite en que este índice tiende a infinito se obtiene una ecuación de estado tipo gas ideal, con P proporcional a la densidad. Son de especial interés las configuraciones esféricamente simétricas de fluidos auto-gravitantes que responden a la ecuación de estado politrópica recién mencionada arriba. Estas configuraciones son gobernadas por la ecuación diferencial de Lane-Emden, que surge de combinar la ecuación de Poisson, la condición de equilibrio hidrostático y la ecuación de estado politrópica. Las esferas politrópicas en contextos astrofísicos pueden describir configuraciones auto-gravitantes de gas o configuraciones estacionarias de sis-

temas auto-gravitantes de N cuerpos que satisfacen las ecuaciones acopladas de Vlasov-Poisson.

En el contexto de las soluciones de las ecuaciones de Vlasov-Poisson, las esferas politrópicas (también llamadas politropas estelares) corresponden a las configuraciones en las que, en cada punto del espacio, la distribución de velocidades de las partículas del sistema está dada por una ley de potencia. Nosotros encontramos rasgos muy importantes de tal distribución, que la vinculan con la entropía de Tsallis, como se discute abajo.

Las galaxias son importantes ejemplos de sistemas auto-gravitantes de N cuerpos descriptas por una distribución de partículas en el espacio de las fases de seis dimensiones, $f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$. Diversos aspectos de la estructura galáctica pueden describirse satisfactoriamente suponiendo que f es una solución estacionaria de la ecuación de Boltzmann no-colisional, también llamada ecuación de Vlasov. De acuerdo al teorema de Jeans, toda solución estacionaria de tal ecuación depende de las coordenadas del espacio de fases a través de integrales de movimiento del potencial galáctico. Para sistemas con simetría esférica éstas son la energía y el impulso angular. Si se considera el caso más sencillo (dependencia sólo de la energía), un principio variacional entrópico nos lleva al modelo estelar politrópico [Plastino y col. (1993a)], el tercer artículo de la literatura Tsalliana]. Éste es mi trabajo más referenciado, con 455 citas (Scholar Google) a febrero del 2014 (mi hijo tiene otro *paper* con muchas más citas que éste). Las galaxias contemporáneas han adquirido su forma actual como resultado de un proceso de relajación, que conduce a las distribuciones galácticas de equilibrio (o meta-equilibrio) hoy observadas. El resultado de este

proceso debiera poder obtenerse de un principio variacional apropiado. Un candidato natural para este principio, en concordancia con la metodología de Jaynes, sería optimizar la entropía de Shannon bajo las condiciones impuestas por las cantidades físicas relevantes conservadas, como la masa y la energía. Tal programa fue explorado por el astrofísico Británico Lynden-Bell de Cambridge. Lamentablemente, esta extremización conduce a la distribución de la esfera isoterma, caracterizada por una masa **infinita**. Este resultado no físico nos motivó a buscar OTRAS entropías, y teníamos justo en ese momento la de Tsallis para probar. Implementando el proceso de maximización con su entropía ¡los infinitos desaparecen! Como debiera ser, reaparecen si el índice de no aditividad q tiende a la unidad, y la entropía de Tsallis converge a la de Shannon. Además, puede verse de consideraciones físicas que q no puede ser negativo y debe ser mayor que $9/7$, lo que ha sido corroborado en los últimos 20 años por muchos otros trabajos. Pudimos así demostrar, por vez primera la relevancia de la entropía de Tsallis S_q en un escenario donde la de Shannon produce divergencias. ¿Por qué falla Shannon aquí? Porque estamos tratando con interacciones de largo alcance. La mecánica estadística convencional no puede lidiar con ellas, como ha sido visto en numerosas ocasiones a partir de nuestro trabajo, el primero en vincular la entropía de Tsallis con las interacciones de largo alcance. Nuestro paper estimuló a otros investigadores a continuar explorando estas ideas, aplicando S_q en diversos contextos que involucran interacciones de largo alcance. En particular, inspiró numerosos trabajos donde tales vinculaciones se aplicaron a la física de plasmas (en especial, plasmas astrofísicos). Podemos mencionar asimismo, en años recientes, aplicaciones de S_q (y su conexión

con distribuciones politrópicas) al modelado de los halos galácticos de materia oscura.

El desarrollo del formalismo de Jaynes para la entropía de Tsallis constituyó nuestro siguiente problema y resultó en nuestro segundo trabajo en el tema y el cuarto en la historia de la entropía de Tsallis [Plastino y col. (1993b)] En su paper original, Tsallis utilizó los valores medios convencionales. Si una cantidad física A toma valores a_i con probabilidades p_i entonces

$$\langle A \rangle = \sum_i p_i a_i \quad (1)$$

Ésta tan natural elección impedía obtener, sin embargo, la función de partición Z en forma sencilla. Ello motivó a Constantino, junto a su entonces doctorando Evaldo Curado, a modificar la definición de valor medio. En lugar de (1) ellos introducen, el 2º. paper de la saga Tsallis

$$\langle A \rangle_q = \sum_i p_i^q a_i \quad (2)$$

lo que permite obtener Z en forma cerrada. El tema era reconciliar (2) con el formalismo de Jaynes, cosa que hicimos en el artículo arriba mencionado, el 4º paper de esta historia, recuperando las relaciones ortodoxas entre los multiplicadores de Lagrange, los valores medios (2) y S_q . Por cierto, los valores medios tipo (2) fueron eventualmente reemplazados por otras dos formas matemáticas más adecuadas. La definición más utilizada hoy fue originada por C. Tsallis, R. Mendes y A. R. Plastino, y la última por mis Becarias Flavia Pennini, Sandra Martínez y yo mismo. Algún tiempo después, Sandra, Gustavo Ferri (cuya tesis dirigí) y el suscrito mostramos que las cuatro formas son en realidad equivalentes, en el sentido de que los resultados de cualquiera de ellas pueden ser traducidos a los arrojados por las otras tres por medio de un "diccio-

nario" apropiado [Martínez y col. (1995)].

La teoría de la información fue creada por C. Shannon en 1948, en forma casi completa. Poco después (principios de los 50's) fue axiomatizada por el gran matemático soviético A. I. Kinchin sobre las bases de cuatro postulados, el último de los cuales está relacionado con la aditividad. Obviamente, la entropía de Tsallis lo viola. Nosotros mostramos que reemplazándolo por la ecuación (3) obtenemos una axiomatización adecuada [Plastino y col. (1996) y (1999)] Lamentablemente, debo señalar que este resultado fue, años después, "redescubierto" por otros investigadores del primer mundo, sin citarnos. Esto suele suceder a los científicos del tercer mundo, que no disponemos, generalmente, de los medios necesarios para asistir a un número suficiente de conferencias internacionales como para publicitar adecuadamente nuestros resultados y establecer una masa crítica de "contactos".

Al releer el maravilloso trabajo de W. Gibbs de 1902 sobre los fundamentos de la mecánica estadística, en la que se la axiomatiza por vez primera (la 2ª. la haría E. Jaynes in 1957, usando la teoría de la información de Shannon), vimos que el origen de la entropía de Tsallis estaba allí ya implicado [Plastino y col. (1994)] Consideremos un sistema \underline{S} de niveles de energía e_i interactuando débilmente con un baño térmico \underline{B} . El sistema total $\underline{T} = \underline{S} + \underline{B}$ tiene energía constante E_0 con error $\pm\delta$, con δ mucho menor que E_0 . Nuestra idea básica es que estamos tratando con una baño muy grande pero *finito* de energía E_B finita. La probabilidad de encontrar al sistema \underline{S} en un estado $i >$ de energía e_i será proporcional al número de estados del sistema total n_i compatible con tal escenario. Sea $\eta(E)$ el No. de estados (por unidad de

intervalo de energía) del baño en un entorno de E . Entonces, el número n_i estará dado por $n_i = 2 \delta \cdot \eta(E_o - e_i)$, implicando el cociente de probabilidades para los estados i, j

$$(p_i / p_j) = [\eta(E_o - e_i) / \eta(E_o - e_j)]. \quad (3)$$

Suponiendo ahora que el número de estados del baño con energía $\leq E$ crece como una potencia α de E . Esto sucede frecuentemente. Por ejemplo, un conjunto de N partículas libres no relativistas o de N osciladores armónicos. La relación (3) conduce entonces, si $b = \alpha - 1$ [ver el maravilloso libro de Reif (1965), mi texto favorito de Mecánica Estadística para cuestiones básicas] de modo que $\eta(E) = \text{constante} \cdot E^b$, dado que η es esencialmente la derivada de $M(E)$ con respecto a E . Un poco de álgebra conduce inmediatamente ahora a la distribución canónica de Tsallis (llamada q -exponencial), con $q = (\alpha - 2 / \alpha - 1)$ y, en el límite en que q tiende a la unidad, un análisis más detallado muestra que el No. de partículas del baño tiende a infinito (ver nuestro recién paper) y la distribución de Tsallis tiende a la canónica exponencial de Gibbs.

Moraleja: el mismo camino que Gibbs recorrió para deducir su distribución canónica nos lleva también a la de Tsallis, si el baño térmico no es infinito. Más aún. Como baños infinitos estrictamente hablando NO existen en la Naturaleza, podemos pensar la distribución de Gibbs como una *idealización* de la "real", que sería la de Tsallis. ¡Esto no es mera especulación! Un reciente y cuidadoso análisis de los dispositivos experimentales, efectuado con mi amigo Christophe Vignat [Vignat y col. (2009)] de Orsay, confirma tal aseveración.

La transformada de Legendre es una operación que transforma una función f de la variable real x en

otra f_T de una variable diferente y , manteniendo constante su contenido informacional. La derivada de la función f es el argumento de f_T .

$$f_T(y) = xy - f(x) \text{ con } y = f'(x) \Rightarrow \text{relación de reciprocidad}$$

La transformada de Legendre es su propia inversa. Se usa para pasar de la formulación Lagrangiana de la mecánica clásica a la Hamiltoniana. Las relaciones de reciprocidad de Legendre constituyen el ingrediente formal esencial de la Termodinámica.

Vimos que el formalismo informacional de Jaynes puede acomodar sin problemas tanto la entropía de Shannon como la de Tsallis. ¿Qué otras formas entrópicas puede también acomodar?. La respuesta es **todas**. Esto fue demostrado en [Plastino y col. (1997)]. Mostramos allí que la estructura invariante frente a transformadas de Legendre, que es el rasgo fundamental de la Termodinámica, no depende, a nivel microscópico, de la forma funcional de la entropía $S[p]$, sino que es una consecuencia necesaria del Principio de Máxima Entropía de Jaynes. Además, en el especialmente especial caso del Conjunto Canónico, cualquier forma funcional para el vínculo asociado al valor medio de la energía puede ser acomodado sin problemas.

Por cierto, he continuado trabajando en la problemática de Tsallis hasta el día en que escribo estas líneas. Mi último trabajo aceptado en el tema es, a enero de este año, Plastino (2014).

■ 11. CONNOTACIONES MICROSCÓPICAS DE LA TERMODINÁMICA

La termodinámica es la ciencia de las transformaciones energéticas. Éstas involucran calor y otras formas

de energía, la mecánica siendo la más importante. La energía potencial es la capacidad, en función de la posición, para hacer trabajo. La cinética es la asociada al movimiento, etc. Dado que todo objeto tiene cierta estructura, posee una energía interna que soporta tal estructura. En cuanto al trabajo, tenemos interno y externo. Este último se hace sobre "algo". El primero es hecho "dentro de algo", siendo una suerte de "capacidad". La termodinámica i) estudia e interrelaciona las variables macroscópicas, como temperatura, volumen y presión, que se emplean para la descripción de sistemas térmicos y ii) se ocupa de fenómenos empíricamente reproducibles.

El interés se centra en estados especiales del sistema llamado *de equilibrio*, estados estacionarios a los que se llega luego de un proceso de estabilización. Se considera siempre que los sistemas se han preparado en cierta forma específica y que el estado de equilibrio es único u unívocamente determinado por los valores de los parámetros macroscópicos. La robustez de la termodinámica es única en la física, pues como postulados emplea solamente hechos experimentales. No puede por ende ser falseable en el futuro por algún nuevo e ingenioso experimento. Ninguna otra teoría física tiene tal característica. Históricamente, la termodinámica surgió de la necesidad de aumentar la eficiencia de las primitivas máquinas de vapor, particularmente a través del trabajo del investigador francés Sadi-Carnot (1824). El físico escocés Lord Kelvin fue el primero en definir concretamente la termodinámica en 1854: "Se trata de la relación entre el calor y las fuerzas ejercidas por partes contiguas de los cuerpos, y de la relación entre el calor y la electricidad".

Los axiomas de Gibbs y los de MaxEnt nos dan teorías microscópi-

cas que describen satisfactoriamente la termodinámica del equilibrio, aunque los de Jaynes también dan cuenta de las situaciones fuera del equilibrio. Ahora bien, los de Gibbs son postulados sobre comportamientos en el espacio de las fases y los de Jaynes' se refieren a cantidades pertenecientes a la Teoría de la Información. En ninguna de las dos teorías se da lugar alguno a aserciones macroscópicas empíricamente verificadas, como todas las de la termodinámica. En el año 2005 iniciamos con mi amigo Evaldo Curado del Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF, Río) un programa que tenía por objetivo averiguar hasta qué punto era posible reformular la Mecánica Estadística partiendo de axiomas de carácter macroscópico. El primer paso lo dimos en [Plastino y col. (2005)] El proyecto continúa, habiendo sumado al mismo con importantes aportes a Fernando Nobre (CBPF) y Montserrat Casas (Baleares).

La primera idea es la de dar status de axioma a la aserción básica macroscópica. Es decir: **Axioma 1:**

$$dE = TdS + \sum_m P_m dA_m, \quad (4)$$

en donde las P son variables intensivas y las A extensivas. Como segundo y final postulado tomamos el primero de los axiomas de Kinchin de la Teoría de la Información. **Axioma 2:** Si contamos con W estados microscópicos accesibles, rotulado s con la letra i , cuyas pertinentes probabilidades llamamos p_i , entonces la entropía S es función exclusiva de los W p_i 's. Estos dos postulados casi bastan para reconstruir la Mecánica Estadística habitual. Ésta por ende, se basaría hasta aquí en un postulado macroscópico de origen termodinámico y en uno microscópico que proviene de una teoría matemática: la de la información. ¿Qué

falta? **Axioma 3:** La energía interna E y los parámetros externos A_m deben ser considerados como los valores de expectación de apropiados operadores, a saber el Hamiltoniano H y los operadores hermíticos R_m ($A_m \equiv \langle R_m \rangle$). Por ende, los A_m (y también E) dependerán de los autovalores de tales operadores y del conjunto de las probabilidades $\{p_i, i=1, \dots, W\}$. Notar que los autovalores energéticos van a depender de los R_m .

Podemos colegir que el postulado segundo no es otra cosa que una re-expresión de la conjetura atómica de Boltzmann: las cantidades macroscópicas son promedios estadísticos evaluados usando una distribución microscópica. Ludwig Boltzmann fue el primer científico moderno que "creyó" en los átomos, siendo por ello violentamente atacado por la mayoría de sus contemporáneos. Su teoría cinética de los gases (1866, la tesis doctoral a los 22 años) los presupone. Las críticas a su interpretación estadística de la 2a. Ley de la Termodinámica fueron realmente feroces. Que Boltzmann pretendiera explicar y predecir cómo las propiedades atómicas (masa, carga, estructura) determinan las propiedades de la materia (viscosidad, conductividad térmica, difusión, etc.) resultaba abominable. ¡Recién se extinguieron por completo tales críticas en 1924! Esto, mucho después de su suicidio, en Septiembre de 1906.

Volviendo a nuestros tres axiomas para la Mecánica Estadística, ellos representan aseveraciones de hechos. ¿Por qué? Porque se los toma prestados o bien del experimento (primer axioma) o de teorías pre-existentes. Sorpresivamente, tal vez, ninguno de los tres postulados incorpora conocimiento nuevo. Meramente re-expresan nociones previas. ¿Esto es bueno? Epistemológicamente **Sí**. La ciencia debe guar-

se por el apotegma de la navaja de Ockham. Cuánto menos hipótesis, mejor. Nuestra teoría no podría ser más económica en este sentido. ¡No hay ninguna hipótesis nueva!

Los principales enemigos de Boltzmann, W. Ostwald y E. Mach, propugnaban una supremacía de la termodinámica y criticaban la mecánica estadística de Boltzmann por estar fundamentada en entidades ficticias: los átomos, de cuya existencia no había evidencias en los 1870's. Paradójicamente, nuestra axiomática reivindica la pretensión de preponderancia termodinámica, dado que nuestro primer postulado es la 1ª Ley.

La idea básica es prestar atención al cambio genérico $p_i \rightarrow p_i + dp_i$ constreñido por la ecuación (34). Es decir, los cambios dp_i deben efectuarse de tal manera que (4) no sea violada. Nuestras principales cantidades macroscópicas S, A_m y E variarán con dp_i , pero los concomitantes cambios sólo pueden ser arbitrarios dado que tienen que ser compatibles con (34). Nótese una ventaja importante de nuestra axiomática. Las de Gibbs o Jaynes estipulan de entrada quién es S (su forma funcional). La nuestra no. **Es decir, la forma microscópica de la entropía no viene predeterminada por la termodinámica.**

Estudiando ahora el cambio de (4) bajo la transformación $p_i \rightarrow p_i + dp_i$ uno se encuentra con una grata sorpresa. Las ecuaciones resultantes resultan ser las mismas que arroja el problema variacional de Jaynes: las ecuaciones de MaxEnt. Se puede pues demostrar que tales ecuaciones se derivan de nuestra axiomática. Y como de las ecuaciones de Jaynes se deriva toda la mecánica estadística, esta sigue pues de nuestra axiomática también. Y viceversa.

Por ende, nuestra axiomática es enteramente equivalente al sistema de postulados de Jaynes. Como señal de la recepción que estos conceptos han recibido podemos citar, con cierto orgullo, lo siguiente. Nuestra teoría fue publicada como un capítulo del libro [Plastino y col. (2012)] Este capítulo ha sido bajado de la Web 4000 veces a diciembre de 2013.

■ 12.- CONSIDERACIONES FINALES

Al momento de redactar esta reseña el No. de publicaciones referenciadas en Revistas Científicas Internacionales Periódicas que lista mi CV asciende a 557. Obviamente, no he tenido espacio aquí para hablar de la mayoría de ellas, y esto no implica que las considere menos importantes que aquéllas que sí han aparecido específicamente arriba. Tal vez pueda interesar mi factor h , que es de 44 según Google Scholar. Distinciones no previamente citadas que me interesan mencionar son 1) mi Doctorado Honoris Causa por la Universidad de Pretoria (1997), 2) El *Scopus-Elsevier Prize to the most cited Argentine physicist*, otorgado por el período 1998-2008, 3) ser Miembro de la Academia Brasileña de Ciencias (1994) y 4) ser Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias (1997).

Tengo 74 años y estoy jubilado de CONICET, pero en la categoría de "contratado", lo que me permite seguir activo. Estoy dirigiendo dos Tesis Doctorales y un Investigador Asistente. He publicado 16 papers en 2013 y empezado en tal vena bastante fuerte el 2014. En cambio, mi vida política ha menguado sensiblemente, pues se necesitan para acometerla fuerzas que ya no tengo. Mi última actividad importante aquí fue integrar el "Gabinete en las sombras" del Dr. Rodolfo Terrag-

no, en el período que le tocó presidir el Comité Nacional de la UCR: 1995-1997. Ello me permitió recorrer el país (mayormente a costa de mi bolsillo) y formarme muy buena idea del estado de la educación en Argentina. De paso, poder hablar en nombre del Comité Nacional en los comités locales de ciudades, pequeños pueblos y aún pequeños caseríos de nuestro vasto territorio, es algo que me resultaba encantador.

Trataré de seguir científicamente activo hasta que mi salud diga basta., con mis intereses de siempre: Jazz y Tango, Ciencia-Ficción, Ajedrez y Ciencia. En el último rubro, y como muchos otros físicos, e incurrido últimamente en Biología, Neurología y Ciencias Sociales. Cito un solo ejemplo. La localización temporal de transición tónico-clónica en epilepsias, que no se aprecia claramente en los EEGs, y donde entran nuestros cuantificadores informacionales. En el libro [Gell-Mann (2004)] se muestra como la complejidad estadística, concepto en el que he invertido mucho esfuerzo, claramente ubica correctamente el lugar de la transición en el eje temporal.

■ BIBLIOGRAFIA

Bosch, H., Krmpotic, F., Plastino, A. (1963) *Beta Spectroscopy with solid-state Detectors*, Nuclear Instruments and Methods **23**, 79.

Plastino, A., Arvieu, R. Moszkowski, S. (1966) *Surface delta interaction in single closed Shell nuclei*, Physical Review **145**, 837.

Yucker, W, Plastino, A., Moszkowski, S. (1967) *Surface Delta Interaction and Electromagnetic Transitions in Tin and Lead Isotopes*, Zeitschrift fuer Physik **203**, 177.

Plastino, A., Abecasis, Sara, Bosch, H. (1969) *Features of the Dad-*

ydov Model, Nuclear Physics A **129**, 434.

de Llano, M, Plastino A. (1976a) *Hartree-Fock States in the Thermodynamic Limit* Physical Review A **13**, 1633.

de Llano, M, Plastino A. (1976b) *Possibility of Self-Consistent long-range Order in Nuclear Matter*, Physical Review Letters **37**, 556.

Aguilera-Navarro, V. C., de Llano, M., Peltier, S, Plastino, A (1977) *Hartree-Fock States in the Thermodynamic Limit. II. Generalized Overhauser Orbitals*, Physical Review A **15**, 1256

Aguilera-Navarro, V. C., Andrade, S., Zimerman, A., Donhert, L., de Llano, M., Plastino, A (1977b) *Low Density Clustering Effects of Skyrme Interactions in Nuclear Matter*, Physical Review C **16**, 2031.

de Llano, M, Donhert, L., Plastino, A (1978) *Hartree-Fock in the Thermodynamic Limit. III. Low Density Clustering Effects*, Physical Review A **17**, 767.

Barrera, R, de Llano, M, Peltier, S, Plastino, A. (1978b) *Self-Consistent Long-range Order in a Deformable-Jellium Model* Physical Review B **18**, 153.

Cambiaggio, M. C., Plastino, A. (1978) *Quasi-Spin Pairing and the Structure of the Lipkin Model*, Zeitschrift fuer Physik A **288**, 153.

Plastino, A, Moszkowski, S. A. *Simplified Model for Illustrating Hartree-Fock in a Lipkin Model Problem*, Il Nuovo Cimento **47^a**, 470.

- Plastino, A, Curado, E. M. F. (2010) *Finite Temperature approach to quantum phase transitions*, International Journal of Bifurcation and Chaos **20**, 397, 401.
- Zander, C, Plastino, A., Plastino, A. R. (2009) *Quantum entanglement in a many-body system exhibiting multiple quantum phase transitions*, Brazilian Journal of Physics **39**, 464.
- Cambiaggio, M. C., de Llano, M., Plastino, A., Szybisz, L. Ramirez, S. (1980) *Zero Order Crystallization in the Bethe-Fermi Homework and Electron Gas Problem*, Nuclear Physics A **339**, 277.
- Baker, G. A., Benofy, L. P. Fortes, M., de Llano, M. Peltier, S, and Plastino, A. (1982) *Hard-core square-well fermions*, Physical Review A **26**, 3575.
- Otero, D., Proto, A, Plastino, A. (1981) *Surprisal Approach to Cold Fission Processes*, Physics Letters B **98**, 225.
- Otero, D., Plastino, A., Proto, A, Zannoli, G. (1982) *Erhenfest Theorem and Information Theory*, Physical Review A **26**, 1209.
- Sarris, C., Plastino, A., Proto, a. (2013), *Difficulties in evaluating Lyapunov coefficients for Lie governed dynamics*, Journal of Chaos, Volume 2013, Article ID 587548.
- Feynman, R, (1948) *Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics*, Rev. Mod. Physics **20**, 367.
- Wheeler. J- A- (1990), Capítulo 1 del libro *Complexity, entropy, and the physics of information*, Editado por W. H. Zurek (Addison-Wesley, New York).
- Katz, A. (1957) *Principles of Statistical Mechanics*, Freeman, San Francisco.
- Canosa, N, Plastino, A., Rossignoli, R. (1989) *Ground-state wave functions and maximum entropy*, Physical Review A **40**, 519.
- Canosa, N, Rossignoli, R, Plastino, A. (1990) *Maximum Entropy Principle for Many-Body Ground States*, Nuclear Physics A **512**, 492.
- Canosa, N., Rossignoli, R., Plastino, A. (1991) *Information Theory and Energy Spectra*, Physical Review A **43**, 145.
- Canosa, N., Rossignoli, R., Plastino, A, Miller, H. G. (1992) *Quantal Entropy, Fluctuations and the Description of Many Body Ground States*, Physical Review C **45**, 1162.
- Canosa, N. Plastino, A. Rossignoli, R. (1992) *Maximum Entropy Correlated Ground State and the Description of Collective Excitations*, Nuclear Physics A **550**, 453.
- Casas, M. Plastino, A., Puente, A., Canosa, N., Rossignoli, R. (1993) *WKB Wave Functions without Matching*, Physical Review A **47**, 3530.
- Arrachea, L. Canosa, A. Plastino, A., Portesi, M., Rossignoli, R. (1992) *Maximum Entropy Approach to Critical Phenomena in Finite Quantum Systems*, Physical Review A **45**, 7104.
- Plastino, A. R., Plastino, A. (1993) *Maximum Entropy and Approximate Description of Pure States*, Physics Letters A **181**, 446.
- Plastino, A.R., Casas, M., Plastino, A., Puente, A. (1995) *Quantum inference methods and hypervirial theorems*, Physical Review A **52**, 2601].
- Tsallis, C. (1988) *Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics*. Journal of Statistical Physics **52**, 479].
- Plastino, A. R., Plastino, A. (1993a) *Stellar polytropes and Tsallis' entropy*, Physics Letters A **174**, 384.
- Plastino, A. R., Plastino, A. (1993b) *Tsallis Entropy, Erhenfest Theorem and Information Theory*, Physics Letters A **177**, 177.
- Curado, E. M. F., Tsallis, C. (1991) *Generalized statistical mechanics: connection with thermodynamics*, Journal of Physics A **24**, L69.
- Martínez, S., Ferri, G., Plastino, A., (1995) *The role of constraints in Tsallis' nonextensive treatment revisited*, Physica A **345**, 493 y *Equivalence of the four versions of Tsallis' statistics*, Journal of Statistical Mechanics, P04009.
- Plastino, A. R., Plastino, A. (1996) en *Condensed Matter Theories*, Volume 11, Editado por Nova Science, New York, 1996, pág. 341.
- Plastino, A. R., Plastino, A. (1999) *Tsallis entropy and Jaynes' information theory formalism*, Brazilian Journal of Physics, **29**, 50.
- Plastino, A. R., Plastino, A. (1994) *From Gibbs' Microcanonical Ensemble to Tsallis' Generalized*

- Canonical Distribution*, Physics Letters A **193**, 140.
- Reif, F.(1965), *Fundamentals of statistical and thermal physics* (Mc Graw-Hill, New York).
- Vignat, C., Plastino, A.(2009) *Why is the detection of q-Gaussian behavior such a common occurrence?*, Physica A **388**, 601.
- Plastino, A., Rocca, M. C. (2014) *Possible divergences in Tsallis' thermostatics*, European Physics Letters en Prensa.
- Plastino, A., Plastino, A. R. (1997) *On the universality of thermodynamics' Legendre transform structure*, Physics Letters A **226**, 257.
- Plastino, A., Curado, E. M. F. (2005) *Equivalence between MaxEnt and enforcing $dU=TdS$* , Physical Review E **72**, 047103.
- Plastino, A., Curado, E. M. F., Casas, M. (2012) *Thermodynamics - Fundamentals and Its Application in Science*, INTECH, Rijeka, Croatia, (2012), capítulo 5 intitulado: Thermodynamics' microscopic connotations.
- Plastino, A., Martin, M. T., Rosso, O. A. (2004) *Generalized information measures and the analysis of brain electrical signals*, en "Nonextensive Entropy: interdisciplinary applications", Oxford University Press, New York, editado por Murray Gellman y Constantino Tsallis.

El artículo 41 de la Constitución Nacional expresa:

Todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano, y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes, sin comprometer las de las generaciones futuras.

Para ello, trabajamos en el Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (3iA) en docencia, investigación y desarrollo tecnológico.

3iA



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INGENIERÍA AMBIENTAL
www.unsam.edu.ar