

COLABORACIONES

Chen Ning Yang, un gran físico del siglo XX

En el artículo (1) "El espejo roto" correspondiente al número 1 de 1998 de **100cias@uned**, los profesores M. Yuste y J. J. García-Sanz describían con todo detalle el experimento llevado a cabo por Madame Wu, mediante el cual se confirmaba la *violación de la paridad* por las interacciones débiles (2), tal y como habían predicho T.D. Lee y C.N. Yang (3) en 1956, y por la que compartieron el Premio Nobel en 1957. Con motivo de dicho artículo, uno de los autores, conocedor de mi interacción con el profesor C.N. Yang, me invitó a escribir para esta revista una semblanza sobre su personalidad científica. Precisamente, en junio de 1999 la Universidad de Stony Brook en New York le tributará un homenaje con la participación de eminentes físicos que a lo largo de su vida interaccionaron con él, así como con la de los doctorandos que realizaron la tesis doctoral en su departamento en dicha universidad. En el año 1992, con motivo de su septuagésimo cumpleaños, los Premios Nobel J. Cronin y S.C.C. Ting, el físico Medalla Field E. Witten, y otros eminentes científicos como F. J. Dyson, S.S. Chern, R.J. Baxter, E. Teller, G.E. Brown, M. Dresden, C.W. Chu, T.T. Wu, T.M. Yan, B. Sutherland, R. Mills y D. Gross, hicieron una semblanza de su personalidad científica y humana que está recogida en un libro (4), cuyo título es el que encabeza este artículo (basado precisamente en dicho libro), conjuntamente con las conversaciones mantenidas con él durante las visitas que realizó a Santiago de Compostela en los años 93 y 96. Yang previamente había visitado España en el año 1978 con motivo del centenario de la Real Sociedad Española de Física y Química, pronunciando una conferen-

cia en el aula magna de la Facultad de Física de la Universidad Complutense. En el año 1992 formó parte del Comité Asesor Científico de la Conferencia sobre *Dinámica de la producción de muchas partículas*, celebrada en Santiago de Compostela, aunque tuvo que postergar su visita al año siguiente. En dicho año, con motivo del año Jacobo'93, se pronunciaron múltiples conferencias por personalidades relevantes de todos los campos, incluyendo un conjunto relacionadas con ciencia y cultura.

Yang pronunció, dentro de este ciclo, la conferencia *Simetría y Física*, una semana después de la pronunciada por su amigo, y también Premio Nobel, Jack Steinberger, conferencias publicadas conjuntamente con las del resto del ciclo, en el libro *Estructuras del Universo* (5). Steinberger coincidió con Yang en Chicago cuando los dos estaban haciendo el doctorado. Refiriéndose a esa época, Steinberger nos habló sobre la inteligencia e intuición ya deslumbrantes de Yang, así como de su amabilidad y preocupación por los compañeros. Steinberger empezó haciendo una tesis teórica y Yang experimental, pero los avatares de la vida, y quizás sus habilidades, les hicieron cambiar y acabar siendo el primero experimental y el segundo teórico. Yang me decía que las opiniones de Steinberger hacia su persona eran fruto de su amistad, y recordaba que en aquellos tiempos ambos eran pobres como muchos estudiantes, pero Steinberger estaba casado y con un bebé, con lo cual su situación era todavía de más estrechez. Vivía en una caravana situada al borde del campus de la Universidad de Chicago. Yang iba muchas veces a cenar con los Steinberger, sobre todo porque así podía llevar alimentos sin que se notase mucho su ayuda.

En el tiempo de doctorado, primero entró en un laboratorio experimental, pero pronto quedó claro que

sería mucho mejor físico teórico que experimental. Según dice Teller (4), los esfuerzos de Yang en Física experimental se pueden resumir en el rumor circulante en Chicago en forma de pareado

*If there is a bang;
It is Yang*

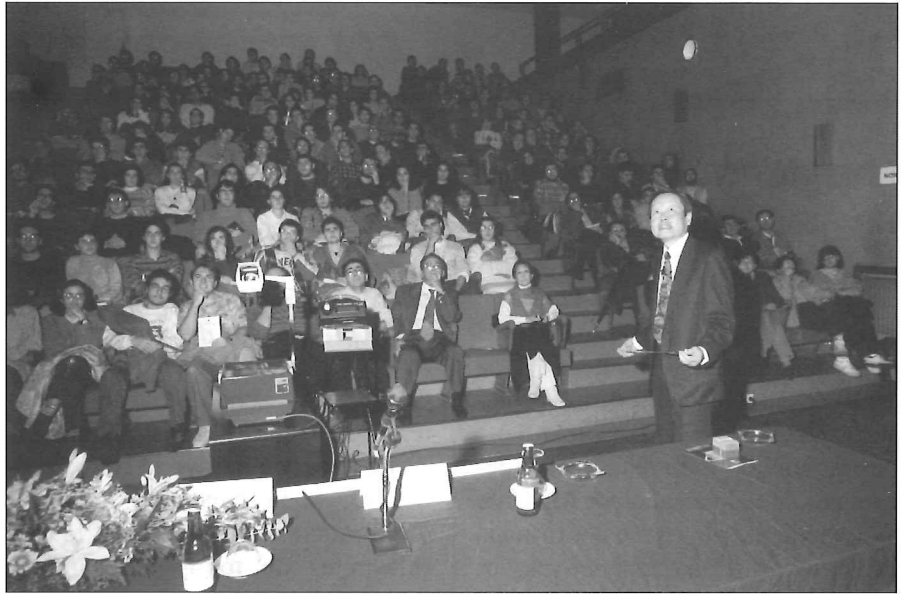
Fermi le indicó un tema para su futura tesis, pero al poco tiempo le advirtieron que, como extranjero, no podía seguir investigando en dicha línea, pues era materia reservada. Las lecciones que Fermi impartió a los jóvenes doctorandos en aquel tiempo influyeron e impactaron enormemente en Yang. Para Yang, Fermi ha sido el físico más original y con más intuición física que ha conocido a lo largo de su vida (6). Solamente teniendo en cuenta el entorno de C.N. Yang y los eminentes físicos que éste ha conocido, se puede calibrar la grandeza del elogio hacia Fermi. Yang se sentía admirado por la rapidez, originalidad y certeza con que Fermi abordaba los temas de sus lecciones. Antes de entrar en caminos clásicos y trillados, buscaba siempre un enfoque personal para pasar después a confrontar el camino original esbozado con el camino clásico. Esto hacía abrir nuevas perspectivas a los estudiantes.

Un nuevo tema de tesis fue dado por Edward Teller a Yang. Esta vez se trataba de ver si era capaz de probar que la distribución angular de los fragmentos nucleares de la reacción nuclear $d + d$ estaba relacionada con el momento angular (4). Yang se lo demostró rápidamente en menos de 4 páginas. Teller le sugirió que generalizase la demostración a núcleos con spin $1/2$ y que eso podía servirle como tesis. Yang lo hizo de inmediato, añadiendo sólo dos páginas a las cuatro iniciales. Así continuó el proceso de generalización hasta que la tesis llegó a tener treinta páginas, y Teller consideró que era más que suficiente. Según Teller, es una de las mejo-

res tesis dirigidas por él y, desde luego, la más corta.

Antes del artículo sobre la paridad en 1956, Yang había publicado importantes investigaciones, entre las que destaca la que generaliza las teorías de gauge a simetrías de gauge no abelianas: es la teoría conocida como de Yang – Mills (7), publicada en 1954. La importancia de las teorías de gauge no abelianas no fue completamente reconocida hasta muchos años después, con el establecimiento del modelo standard, es decir, la teoría electro-débil de Weinberg y Salam, que unifica las interacciones electromagnéticas y las débiles, y la teoría de la cromodinámica cuántica, que describe las interacciones fuertes. Las dos teorías son teorías de Yang-Mills. Las investigaciones que condujeron a la formulación de las teorías de gauge no abelianas fueron hechas en colaboración con Robert Mills, un estudiante de Columbia que estaba a punto de acabar su tesis, visitante durante un cierto tiempo en el laboratorio nacional de Brookhaven, situado en Long Island cerca de New York, coincidiendo con Yang, que también fue visitante en el período 1953/54, compartiendo despacho con él.

Igual que en el caso de la violación de la paridad, Yang encontró también resistencias en la aceptación de sus ideas entre muchos eminentes físicos, entre los que se encontraba W. Pauli. Yang recuerda (6) un seminario que dio en el Centro de Estudios Avanzados en 1955. Entre el público se encontraba W. Pauli que pasaba unas semanas allí. Al poco tiempo de empezar, Pauli preguntó cuál era la masa de los bosones vectoriales asociados al gauge. Yang le contestó que más adelante discutiría el problema de las masas de los bosones de gauge. El seminario continuó, pero al cabo de un cierto tiempo Pauli volvió a preguntarle que cómo podrían adquirir masa dichos bosones para que las interacciones que describían no tuviesen alcance infinito. Yang contestó que ese era el problema fundamental sobre el que había pen-



El Profesor Yang durante la conferencia "Simetrías y Física" en la Universidad de Santiago de Compostela en 1993.

sado bastante, pero que aún no había encontrado solución. Pauli le dijo que esa no era una contestación satisfactoria, con lo cuál se hizo un silencio. Yang se sentó y el seminario estuvo interrumpido un cierto tiempo hasta que Oppenheimer pidió a Yang que continuase. Habría que esperar unos años hasta que Brout y Engels, e independientemente P. Higgs, propusieran la rotura espontánea de la simetría y el mecanismo de Higgs para contestar la pregunta de Pauli. En opinión de Yang, el mecanismo de Higgs no es totalmente satisfactorio, pues de alguna manera las partículas de Higgs son introducidas *ad hoc*. Piensa que nuevas ideas y perspectivas, que probablemente estén relacionadas con el concepto de simetría, puedan permitir el dar un salto cualitativo y resolver el problema de las masas (6).

En cualquier caso, como dice el gran teórico David J. Gross (4), "*las teorías de gauge ejemplifican uno de los misterios más profundos de la naturaleza y son el origen de nuestro mayor gozo en la exploración de la naturaleza. En la medida que verificamos más profundamente microscópicamente la simplicidad de la naturaleza, necesitamos estructuras matemáticas más y más profundas; estructuras profundas,*

interesantes, bellas y poderosas". O, citando a Dirac, "*Parece ser uno de los hechos fundamentales de la naturaleza que las leyes físicas fundamentales se describan en términos de gran belleza y poder. A medida que pasa el tiempo, es cada vez más evidente que las reglas que el matemático encuentra interesantes son las mismas que la Naturaleza elige*".

En 1996, en una de las conferencias que dio Yang en Santiago de Compostela, en la que hizo un *review* sobre la simetría de gauge (8) a lo largo de los siglos XIX y XX, también puso de relieve la belleza de las teorías de gauge no abelianas (8).

Aparte de las teorías de Yang-Mills y la violación de la paridad, hay una tercera aportación crucial para posteriores desarrollos en diversos campos de Física y Matemáticas, la ecuación conocida con el nombre de Yang-Baxter. El hamiltoniano de N cuerpos unidimensionales con interacciones del tipo delta

$$H = \sum_{i=1}^N P_i^2 + 2c \sum_{i < j} \delta(x_i - x_j) \quad (1)$$

había sido resuelto por Lieb y Liniger en 1963 para el caso de bosones.



El Profesor Yang firmando en el libro de oro de la ciudad de Santiago de Compostela en presencia del alcalde de la ciudad y del autor de este artículo.

El hamiltoniano anisotropo del modelo de Heisenberg de spines:

$$H = -\frac{1}{2} \sum_{\tau=1}^L \left\{ \sigma_{\tau}^x \sigma_{\tau+1}^x + \sigma_{\tau}^y \sigma_{\tau+1}^y + \Delta \sigma_{\tau}^z \sigma_{\tau+1}^z \right\} \quad (2)$$

fue resuelto por Yang y su hermano C.P. Yang en 1966 (9). Los dos problemas se pueden resolver utilizando el llamado método de Bethe. Sin embargo, este método no es capaz de resolver el caso en que las N-partículas del hamiltoniano de la ecuación (1) son fermiones, así como muchos otros hamiltonianos describiendo cadenas de spines, como el modelo Hubbard. Yang (10), en 1968 y 1969, mostró que utilizando la igualdad:

$$A(u) B(u+v) A(v) = B(v) A(u+v) B(u) \quad (3)$$

donde A y B son matrices cuadradas y u y v variables, se podían resolver muchos otros problemas. Bill Sutherland, el primer doctorando de Yang en Stony Brook, demostró la generalidad de su método (11). En 1972, R. J. Baxter (12) se dio cuenta de la potencia de la ecuación (3) en problemas de mecánica estadística. En la década de los ochenta empezó a llamarse a la ecuación (3)

ecuación de Yang-Baxter. Hoy en día se ha encontrado que dicha ecuación es muy importante para:

- a) Problemas unidimensionales de Mecánica Cuántica,
- b) Problemas bidimensionales de Mecánica Estadística,
- c) Teoría de campos conforme,
- d) Teoría de nudos,
- e) Teoría de operadores,
- f) Álgebra de Hopf,
- g) Grupos cuánticos, y
- h) Topología de variedades diferenciales tridimensionales.

Su importancia en el campo de las matemáticas es tal, que en el año 1990 tres de las cuatro Medallas Fields concedidas lo fueron por trabajos relacionados con la ecuación de Yang-Baxter.

En el campo de Mecánica Estadística y Materia Condensada, Yang ha iluminado muchos y variados problemas. A continuación indicamos algunos de ellos:

1) **Magnetización espontánea, exponente crítico y universalidad.** Yang, después de un trabajo duro que le llevó seis meses de cálculo, el más largo de su vida según él, obtuvo una expresión simple para la magnetización espontánea del modelo de Ising

bidimensional(13). Yang sugirió a C.H. Chang que extendiese el trabajo al modelo de Ising rectangular, descubriendo que el exponente cúbico era el mismo que en el caso cuadrangular, lo que le llevó a sugerir la universalidad de los exponentes críticos, concepto importante, como pusieron de relieve veinte años después Wilson y Fisher.

2) **Teorema del círculo.** Durante 1951 y 1952, Yang y Lee escribieron varios artículos clasificando las transiciones de fase líquido-gas y deshaciendo varias ideas y conceptos, como el pensar que la transición estaba relacionada con la convergencia de la serie virial. Introdujeron el concepto de fugacidad compleja y probaron elegantemente un teorema, el teorema del círculo, sobre los ceros de la función de partición de la fugacidad en el plano complejo.

3) **El concepto de orden de largo alcance para estados no diagonales de la matriz densidad.** Esto le permitió a Yang (15), en 1962, dar una caracterización rigurosa y formal de las transiciones de fase. Este trabajo tuvo su origen en la preocupación de Yang por entender la condensación de Bose-Einstein en relación con la superfluidez del helio. En los últimos años, Yang se ha preocupado por la condensación de Bose-Einstein y, de hecho, un seminario informal que impartió en el Departamento de Física de Partículas Elementales de Santiago de Compostela versó sobre ello.

4) **Cuantificación del flujo magnético.** Nina Byers y Yang (16), en 1961, sugirieron que el tratamiento correcto para la descripción de la cuantificación del flujo magnético en superconductores debía utilizar la propiedad de la función de onda de ser uni-valorada, conjuntamente con la teoría de BCS. Esta idea le llevó después, en 1983, a sugerir un experimento (17) para la verificación del efecto Aharonov-Bohm que

dio lugar, en 1986, a un bello experimento con el resultado más exacto.

Siendo estas contribuciones importantes, quizás lo sean más las realizadas en el dominio de la Física de Partículas, aparte de las teorías de gauge no abelianas, de las que ya hemos hablado, y la violación de la paridad. Citemos alguna de ellas:

1) **Modelo de Fermi-Yang (18).** A raíz del descubrimiento del meson π , Fermi y Yang, en 1949, escribieron un artículo en el que se preguntaban si dicho meson es una partícula elemental o más bien es compuesta. Por ejemplo: un estado ligado protón-antiprotón.

2) **Fuerza de las interacciones.** En 1949, con T.D. Lee y M. Rosenbluth (19), escribió un artículo en el que se clasifican las interacciones por su fuerza.

3) **Simetría CP.** En 1956, en colaboración con T.D. Lee y R. Oehme (20), después de haber propugnado la violación de la paridad P, se interrogan si se conserva el producto de la conjugación de carga C por la paridad P, afirmando que la conservación de CP implicaría la prohibición de la desintegración del llamado meson K largo en 2 piones. Justamente, la detección de dicha desintegración en 1964 por J. Christenson, J. Cronin, V. Fitch y R. Turlay, fue la demostración de la violación de CP, por lo que los tres primeros fueron galardonados con el premio Nobel. En el mismo año del descubrimiento, T.T. Wu y C.N. Yang analizan en un artículo (21) las medidas que se podían hacer en el sistema de mesones K neutros, parametrizando la violación de CP. Ellos introducen por primera vez la terminología de K_S y K_L (K de vida corta y K de vida larga) distintas de los estados propios de CP. Toda la fenomenología construida entonces es la que se usa hoy en día.

4) **Número cuántico G.** En 1956, en colaboración con T.D. Lee, combinan la conservación de C con la simetría de isospin para propugnar un nuevo número cuántico, G, conservado por las interacciones fuertes (22). Independientemente L. Michel y A. Pais hicieron la misma propuesta.

5) **Dos componentes del neutrino.** La no conservación de la paridad hizo que Lee y Yang (23) reintrodujesen la teoría de Weyl de dos componentes. Independientemente, A. Salam y L. Landau hacían, separadamente, propuestas similares.

6) **Bosones intermediarios.** La posibilidad de que los bosones intermediarios fuesen los portadores de la interacción débil aparece ya en el trabajo de Lee, Rosenbluth y Yang del año 1949. Posteriormente en la conferencia de Rochester de 1957, Yang tuvo una intervención en la que apuntaba que los bosones vectoriales de gauge fuesen los portadores de la interacción débil.

7) **Conexiones de espacios fibrados y el formalismo integral de campo de gauge.** En un artículo de 1974 (24) y en otro de 1975, realizado en colaboración con T.T. Wu (25), estableció un paralelismo entre los términos matemáticos de espacios fibrados y los de las teorías de gauge, introduciendo conceptos topológicos. De esta manera la topología entraba en Teoría de Campos.

8) **Fenomenología de scattering elástico y de producción de muchas partículas.** Desde 1967 hasta la década de los ochenta, Yang, con varios colaboradores, introdujo primero el modelo geométrico (modelo de Chou-Yang) para describir las colisiones elásticas y, posteriormente, para describir la producción de muchas partículas supuso que la distribución del número de ellas era una superposición de distribuciones de Poisson, cada una de estas distribuciones a un parámetro de impacto fijo (26).

9) **Asignación de paridad del meson π .** Yang, en 1950, mostró que el meson π era pseudoescalar, al proponer medir en la desintegración en dos fotones la orientación relativa de las polarizaciones de los dos fotones. El experimento es delicado y no fue realizado hasta 1959 por Plano, Prodell, Samios, Schwartz y Steinberger. Anteriormente Panofsky, en 1951, e, independientemente, W Chinowski and J. Steinberger, en 1954, habían establecido el carácter pseudoescalar del meson π .

Hasta aquí, algunas de las importantes contribuciones del Prof. C.N. Yang a la Física; su mero recordatorio hace inmenso el aspecto científico de su personalidad. A este aspecto, hay que añadir el aspecto de formador de estudiantes, siempre decidido a ayudar en empresas que merecían la pena. Así se puede entender su cambio de Princeton por Stony Brook en 1966, donde su instituto empezaba y que con la colaboración de Yang consiguió ser uno de los mejores del mundo. C.N. Yang tampoco ha olvidado su país de origen, sintiéndose muy orgulloso de ello. C. N. Yang nunca escatima esfuerzos para ayudar a la Física de China, así como a la de Asia. En particular, su influencia ha sido notable para la fundación del Instituto de Física de Asia, situado en Seul. No nos cabe duda de que por la Física que descubrió, por la belleza y simplicidad de sus realizaciones, Yang será admirado por las generaciones futuras como uno de los físicos más grandes del siglo XX.

BIBLIOGRAFÍA

1. M. Yuste y J.J. García Sanz. 100cias@uned **1**, 84-90 (1998)
2. C. S. Wu *et al.* Phys Rev **105**, 1413 (1957)
3. T.D. Lee y C.N. Yang. Phys Rev **104**, 254 (1956)
4. C.N. Yang a great physicist of the XXth Century. Int. Press Incorporated, Boston (1995)

5. Estructuras del Universo. Editor C. Pajares. Editorial Universidad de Santiago de Compostela (1994)
6. Conversaciones en Compostela. Revista Española de Física 10 (2) 1-3 (1996)
7. C.N. Yang y R. Mills. Phys Rev 95, 631 (1954); 96, 191 (1954)
8. Conferencias del Foro Universitario. P. Ricoer, H. Kung, C. Ayala, C.N. Yang y otros. Ed Univ Santiago de Compostela (1999)
9. C.N. Yang y C.P. Yang. Phys Rev 150, 321 (1966); 150, 327 (1966); 151, 258 (1967)
10. C.N. Yang. Phys Rev Lett 19, 1312 (1967); Phys Rev 168, 1920 (1968)
11. B. Sutherland. Phys Rev Lett 19, 103 (1967)
12. R.J. Baxter. Ann. Phys 70, 193 (1972)
13. C.N. Yang. Phys Rev 85, 808 (1952)
14. C.N. Yang and T.D. Lee. Phys Rev 87, 404 (1952). T.D. Lee and C.N. Yang. Phys Rev 87, 410 (1952)
15. C.N. Yang. Rev of Modern Physics 34, 4, 694 (1962)
16. N. Buyers y C.N. Yang. Phys Rev Lett 7, 46 (1961)
17. Vease la contribución de A. Tonomma en el libro citado en referencia (4)
18. E. Fermi y C.N. Yang. Phys Rev 76, 1739 (1949)
19. T.D. Lee, M. Rosenbluth y C.N. Yang. Phys Rev 75, 905 (1949)
20. T.D. Lee, R. Oehme y C.N. Yang. Phys Rev 106, 340 (1957)
21. T.T. Wu and C.N. Yang. Phys Rev Lett 13, 380 (1964)
22. T.D. Lee and C.N. Yang. Il Nuovo Cimento 10, 749 (1956)
23. T.D. Lee and C.N. Yang. Phys Rev Lett 4, 307 (1960)
24. C.N. Yang. Phys Rev Lett 33, 445 (1974)
25. T.T. Wu y C.N. Yang. Phys Rev D12, 3845 (1975)
26. T.T. Chou and C.N. Yang. Phys Lett B 135, 175 (1984)
- Phys Rev D 32, 1692 (1985). T.T. Chou, C.N. Yang y E. Yen. Phys Rev Lett 54, 510 (1985)
27. C.N. Yang. Phys Rev 77, 242 (1950)

Carlos Pajares

Depto. de Física de Partículas
Universidad de Santiago de Compostela

Optimización Global y Algoritmos Genéticos

1. INTRODUCCIÓN

En buena parte de la Matemática Aplicada es frecuente encontrarse con la situación de tener que optimizar algún tipo de función, para la maximización de un recurso o la minimización de un riesgo. En tales casos, se parte siempre de cierta *función objetivo*

$$f: D \rightarrow \mathbb{R}, \quad (1)$$

planteándose el problema en términos de encontrar algún punto del dominio D , llamémosle x_0 , que cumpla la condición

$$x_0 = \arg \max_{x \in D} f(x)$$

En lo que sigue, y para evitar confusiones, se identificará *optimizar* con *maximizar*. En caso de pretender resolver un problema de minimización, se puede transformar éste en uno de maximización merced a la igualdad

$$\min\{f(x)\} = -\max\{-f(x)\}$$

En muchas situaciones reales la función f es demasiado compleja como para poder ser maximizada con las herramientas del análisis matemático. Algunas complicaciones que se pueden presentar son:

- El dominio D no es un conjunto numérico, sino quizás una familia de grafos representando redes de distribución de transportes.
- La función f puede tener múltiples puntos de discontinuidad.
- La función f no tiene una expresión matemática analítica o algebraica, obteniéndose sus imágenes tras algún proceso de simulación, estocástica o no, que puede dar lugar a la aparición del fenómeno de fractalidad o de no derivabilidad de la función.

Los algoritmos clásicos que se utilizan para maximizar funciones basan su criterio de búsqueda en seguir la dirección de la máxima pendiente (*hillclimbing strategies*). Tienen algunos de ellos la ventaja de no exigir restricciones a la función objetivo, pero su gran desventaja es la de quedarse "atascados" en el primer máximo local que encuentran. Cuando un analista desea maximizar una función, busca el máximo global y difícilmente se conformará con un máximo local o relativo. Así pues, a aquellas situaciones citadas como causantes de aumentar la complejidad del problema planteado, hay que añadir esta otra:

- La presencia de una multiplicidad de máximos locales en los que el algoritmo puede quedar frenado, posiblemente lejos de la mejor solución.

Lo deseable sería disponer de un método que permitiese obtener el máximo global de una función sin exigirle a ésta condiciones difíciles de cumplir. Vaya por delante que tal método no existe, pero la familia de los Algoritmos Genéticos (AG) permite alcanzar soluciones de compromiso, generalmente aceptables, que si bien no aseguran la obtención de los óptimos globales, al menos son capaces de no quedarse frenados en el primer extremo local que encuentran.

2. ALGORITMOS GENÉTICOS

En pocas palabras, los AGs mimetizan la naturaleza cuando ésta actúa de forma que los organismos y especies vivientes se adaptan al medio y evolucionan de manera que su aptitud frente al entorno mejore de una generación a la siguiente como consecuencia de la presión selectiva, provocando la llamada *evolución biológica*. Tanto la acumulación de experiencia por parte del individuo, como su *programa* heredado y almacenado en su código genético, conforman los factores que condicionan su comportamiento frente al entorno. El