

## LO CUÁNTICO Y LO CAÓTICO: SU IMPACTO EN LO SOCIAL

José L. Sánchez-Gómez

Dpto. de Física Teórica

Universidad Autónoma de Madrid

[jl.sanchezgomez@uam.es](mailto:jl.sanchezgomez@uam.es)

### RESUMEN

El presente trabajo expone sin tecnicismos algunos aspectos básicos del caos determinista y de la física cuántica de mayor interés para personas dedicadas a las ciencias sociales, esbozando las aplicaciones más espectaculares de estos dos campos de la física actual, y en particular de la física cuántica, y analizando brevemente las analogías y diferencias entre ambas disciplinas.

### Palabras clave

Física cuántica, caos determinista, ciencias sociales

### ABSTRACT

QUANTUM AND CHAOS: THEIR IMPACT ON SOCIAL ISSUES

The present paper exposes, without technicalities, some basic aspects of determinist chaos and quantum physics of greater interest for people dedicated to social science, sketching the most spectacular appliances of these two fields of nowadays physics, and particularly quantum physics, and analyzing the analogies and differences between these both disciplines.

### Keywords

Quantum physics, determinist chaos, social sciences

## 1. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de los aspectos caóticos de la mecánica clásica o newtoniana, durante mucho tiempo considerada el paradigma de lo preciso, de lo determinado (el “mecanismo de relojería”, en suma) produjo una auténtica convulsión en la metodología de la física. Además, el llamado “caos determinista”, es decir, la indeterminación en los resultados a pesar de que éstos se obtengan de ecuaciones bien precisas, ha tenido, y tiene, importantes implicaciones pluridisciplinarias: la ubicuidad del caos determinista se constata en astrofísica, química (reacciones químicas), biología de poblaciones, fisiología, economía y un largo etcétera. Por consiguiente, cualquier persona que intente entender en lo posible el desarrollo científico-técnico y social de nuestro mundo debería tener los conocimientos básicos (por supuesto, no necesariamente técnicos) de este importante capítulo de la física contemporánea.

Lo que acaba de afirmarse con respecto al caos determinista es también cierto, elevado a la enésima potencia, en lo referente a teoría cuántica, una teoría que ha convulsionado aun más que la del caos los cimientos de la física clásica y que tiene implicaciones filosóficas –en particular en la teoría del conocimiento- y tecnológicas que, siendo ya enormes, aún están por desarrollarse plenamente.

En este artículo, basado en la conferencia impartida en el “VI Encuentro del Foro Iberoamericano sobre Estrategias de Comunicación (FISEC)”, intentaré exponer sin tecnicismos algunos aspectos básicos del caos determinista y de la física cuántica que, entiendo, son de mayor interés para personas dedicadas a las ciencias sociales, esbozando las aplicaciones más espectaculares de estos dos campos de la física actual, y en particular de la física cuántica, y analizando brevemente la analogías y diferencias entre ambas disciplinas.

## 2. EN PRINCIPIO ERA EL CAOS

El caos determinista no es el caos desordenado, sin leyes, que supuestamente precedió al cosmos, sino un caos más sutil, algo que permanece escondido, reptante, en las ecuaciones deterministas de la mecánica clásica para ciertos sistemas dinámicos y que se manifiesta en forma de impredeción; en el hecho de que para dos condiciones iniciales muy próximas los correspondientes resultados de la evolución regida por dichas ecuaciones, a partir de un cierto tiempo que depende del sistema dinámico en cuestión, sean absolutamente diferentes, haciendo que la predicción, en teoría posible, sea imposible en la práctica.

El pasado 16 de abril moría Edward N. Lorenz, nacido en 1917 y considerado por muchos como el creador de la teoría del caos determinista. Como ha ocurrido a veces con los grandes descubrimientos, el de Lorenz tuvo mucho de casualidad. Era un matemático, que en 1963 se dedicaba al estudio de la meteorología teórica. Tenía bastante prestigio en ese campo, pero prácticamente era desconocido fuera de él. Por entonces intentaba analizar algunas propiedades de fenómenos atmosféricos bastante complejos mediante ecuaciones relativamente sencillas. En cierto estadio de su investigación introdujo un modelo de tres ecuaciones diferenciales no lineales acopladas y lo sometió a prueba en su ordenador. En aquellos tiempos, los ordenadores (computadoras) eran mucho más lentos que los actuales, así que decidió ir a tomar un refrigerio mientras salían los resultados. Cuando al volver los examinó, encontró algo sorprendente: valores finales correspondientes a valores iniciales muy parecidos entre sí eran completamente diferentes. Lo que ocurría era que, sin él saberlo previamente, el sistema de ecuaciones de Lorenz, de apariencia “inofensiva”, contenía la propiedad de dependencia fuerte de las condiciones iniciales, es decir, la semilla del caos. Años más tarde llamaría metafóricamente este fenómeno “el efecto mariposa” (denominación sin duda afortunada): el aleteo de una mariposa en Brasil puede provocar un tornado en Texas.

El trabajo original de Lorenz, publicado en una revista de meteorología, pasó bastante desapercibido para la comunidad científica en general. Más tarde, dos prestigiosos matemáticos americanos, Stephen Smale y James Yorke (que fue quien introdujo la expresión caos determinista) reconocieron públicamente el mérito de este trabajo y dieron a conocer las consecuencias del mismo. A partir de entonces, Lorenz empezó a adquirir fama y popularidad, hasta tal punto que tras su muerte hace unos meses se publicaron obituarios en periódicos de bastantes países, en particular de EE.UU., y en casi todos ellos se le denominaba “padre de la teoría del caos”.

Y sin embargo, pese a la importancia del trabajo de Lorenz, en estricta puridad no puede considerarse a éste padre del caos, o al menos el único padre y, me atrevería a decir, ni siquiera el más importante. En efecto, la cuestión de la sensibilidad a las condiciones iniciales había surgido mucho antes

En 1885, se difundió por todas las academias y centros matemáticos de Europa la noticia de que se convocaba un atractivo concurso internacional patrocinado por el rey Óscar II de Suecia para celebrar su sexagésimo año de reinado. Se otorgaría un importante premio a quien fuera capaz de resolver el llamado problema de tres cuerpos (hallar la solución de las ecuaciones newtonianas para un sistema de tres cuerpos con interacción gravitatoria entre sí). Aparte su interés matemático, la solución de este problema era muy relevante en el estudio de la estabilidad del sistema planetario. El ganador fue el gran matemático francés Henri Poincaré (1853-1912), por su solución del llamado problema restringido de tres cuerpos (un cuerpo mucho menos pesado que los otros dos), donde introdujo métodos completamente nuevos – topológicos en esencia- en el estudio de las ecuaciones diferenciales. El trabajo contenía un error, descubierto por él mismo, que, escrupulosamente, hizo que se destruyera una tirada completa de la revista *Acta Matemática*, donde finalmente libre de ese error fue publicado. Lo importante para lo que aquí nos ocupa es que en el proceso de revisión de dicho trabajo Poincaré llegó a la conclusión de que no podía probarse la estabilidad del sistema. Años más tarde en una de sus obras más conocidas sobre filosofía de la ciencia, *Ciencia*

y *Método (Science et Méthode, 1908)* , decía taxativamente: “Puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan estados finales muy diferentes. Un minúsculo error inicial engendrará un enorme error al final. *La prédiction devient impossible.*”

“La predicción se hace imposible”; eso es justamente lo que Lorenz, de alguna manera, redescubrió muchos años después en un modelo menos complejo que el del problema de los tres cuerpos y que, como ya se ha dicho, popularizó con el afortunado nombre de “efecto mariposa”. Pero sería injusto sólo mencionar a estos dos investigadores; la teoría del caos ha sido –está siendo- elaborada por un número considerable de matemáticos y físicos: los franceses Hadamard y Mandelbrot (nacido en Polonia), descubridor de los fractales, base matemática de los atractores extraños, conjuntos de compleja topología en los que acaban por caer las trayectorias caóticas; los rusos Kolmogorov, Liapunov (introducido de unos parámetros, los ahora llamados exponentes de Liapunov, que cuantifican el grado de caos de un sistema dinámico), Arnold y Sinai ; el belga Ruelle, que ha aplicado a teoría del caos a la importante cuestión de la turbulencia en flúidos; los norteamericanos Birkhoff, Feigenbaum y Yorke (ya citado), y un largo etcétera. Todos ellos no sólo han contribuido al desarrollo y aplicaciones de esta teoría, sino que también la han fundamentado matemáticamente.

En sentido estricto, la existencia del caos determinista, aunque bastante sorprendente, no supone nada revolucionario en los fundamentos de la física (lo que sí es el caso de la teoría cuántica, como se verá inmediatamente). No obstante, su repercusión, no sólo en la física sino en muy diversas áreas de las ciencias naturales e incluso sociales, es considerable. He aquí, muy brevemente, una pequeña muestra:

1. **Astronomía y astrofísica.** El comportamiento caótico de algunos componentes del sistema planetario solar está plenamente demostrado. En algunos casos es bastante espectacular, como ocurre en el

movimiento “a tumbos” de Hiperión, satélite de Saturno. Muy interesante, y no de escasa relevancia para el futuro de la vida y, sobre todo, de la civilización a muy largo plazo en nuestro planeta es el estudio del cinturón de asteroides de muy diversos tamaños que se mueven entre Marte y Júpiter, cuyas trayectorias muestran síntomas caóticos. Alguno de ellos podría colisionar en el futuro con la tierra; la probabilidad es muy pequeña, pero no del todo despreciable, y de hecho se cree, con fundadas razones, que un asteroide de este tipo chocó con nuestro planeta hace unos 65 millones de años, provocando la extinción de los dinosaurios.

2. **Biología.** En biología molecular y microbiología el fenómeno de la complejidad y de la fuerte no-linealidad del comportamiento de las células y de sus componentes moleculares es manifiesta. El estudio matemático de los procesos celulares, y por tanto de su comportamiento en parte caótico, es muy difícil debido a esa complejidad. No obstante, con la ayuda de poderosas herramientas informáticas y de cálculo, se ha producido un claro progreso en esta área de la biología. En lo que se refiere a la “macrobiología”, y en particular a la biología de poblaciones, de evidente interés ecológico, las aplicaciones del caos determinista empezaron hace unos treinta años. Hay que hacer notar que el introductor de la llamada aplicación logística, la primera función discreta en que se manifestó el caos determinista, fue un eminente biólogo, Robert May, que la ha aplicado al estudio de la evolución de poblaciones
3. **Economía.** Es un hecho bien documentado que la estructura de un sistema económico depende en gran parte del desarrollo tecnológico y de la complejidad de la sociedad que “crea” dicho sistema. En niveles de desarrollo bajos y sociedades poco complejas, el sistema económico es prácticamente estacionario; al aumentar el desarrollo y la complejidad, aparecen ciclos en dicho sistema y, cuando el desarrollo es muy alto, los ciclos se hacen cada vez más numerosos e interdependientes, de modo que pueden aparecer los primeros síntomas de caos (como probablemente ocurre en la globalizada

economía actual). Todo esto es, por supuesto, sólo cualitativo y el cuantificarlo requiere unas técnicas matemáticas y computacionales muy elaboradas, en las que se trabaja intensamente en la actualidad en centros de investigación de casi todos los países desarrollados. Desde un punto de vista más concreto y aplicado, el análisis matemático del comportamiento caótico recurrente de los mercados financieros es algo en lo que se viene trabajando desde hace más de veinte años.

Como ya se ha dicho, esto es tan sólo una pequeña muestra del cúmulo de aplicaciones que la teoría del caos tiene en la actualidad. Asimismo, en lo que concierne al desarrollo matemático puro de la teoría, el empleo de poderosos instrumentos de computación está haciendo que poco a poco vayan desvelándose los misterios de este apasionante campo científico.

### **3. TEORÍA CUÁNTICA. LA INDETERMINACIÓN SE HACE BÁSICA**

El advenimiento en 1900 de la hipótesis de los cuantos, formulada por el físico alemán Max Planck, acabó, como él mismo imaginó desde el principio, por convulsionar años mas tarde los cimientos de la física, al crear, independientemente y desde diferentes puntos de vista, Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger la mecánica cuántica. Como a veces ha ocurrido con las grandes ideas y descubrimientos científicos, la “revolución cuántica” iniciada por Planck surgió del análisis profundo de un fenómeno en apariencia no demasiado importante, al menos desde un punto de vista fundamental, como era *la radiación del cuerpo negro*.

El cuerpo negro es un objeto ideal, pero que puede construirse aproximadamente en el laboratorio, que absorbe toda la radiación que le llega. A finales del siglo XIX hubo un gran progreso en óptica y electrotecnia, en particular en el estudio de las propiedades de emisión lumínica de metales a altas temperaturas, debido sobre todo a las necesidades de la entonces incipiente industria luminotécnica. Como consecuencia indirecta de varios

requisitos industriales, el estudio experimental de la radiación del cuerpo negro progresó espectacularmente. En particular, los resultados de medidas de gran precisión de O. Lummer y E. Pringsheim realizadas en 1900 en el Instituto Imperial Físico Técnico de Berlín no podían entenderse mediante la termodinámica y el electromagnetismo “clásicos”, que no eran capaces de explicar las propiedades del espectro de emisión de ese sistema material, el cuerpo negro, y en general de cualquier cuerpo. Para encontrar una explicación de ello, Planck se vio abocado a introducir la discontinuidad en la emisión y absorción de radiación por la materia. De acuerdo con su hipótesis, la radiación –en particular la luz visible- se absorbe y emite por los cuerpos materiales en cantidades discretas -como “paquetes” de radiación-, apareciendo lo que hoy se considera una constante fundamental de la naturaleza: la constante de Planck o constante de acción,  $h$ .

Planck no era ni mucho menos un revolucionario científico y no le gustaba introducir la discontinuidad en física, algo que intuía iba a cambiar drásticamente los fundamentos de esa ciencia. De hecho, en una carta escrita muchos años más tarde (véase: Max Planck, “Autobiografía científica y últimos escritos”, Editorial Nivola, Madrid, 2000), dice que introdujo la hipótesis de los cuantos “como un acto de desesperación” (*als einen Akt der Verszweiflung*) a fin de llegar a la fórmula que explicara la radiación del cuerpo negro. La auténtica revolución empezó con Einstein en 1905, su *annus mirabilis*, en el que también apareció la teoría de la relatividad. En un trabajo publicado ese año, y por el que de hecho obtendría ( y no por la relatividad, al menos directamente) el premio Nobel de 1921 completó de manera esencial el trabajo de Planck, introduciendo los cuantos de luz o cuantos de radiación y aplicando su teoría a la explicación del efecto fotoeléctrico, un fenómeno que tantas aplicaciones tendría en los años siguientes (sobre todo a partir de 1920). Estos trabajos de Planck y Einstein tuvieron continuación en la llamada “vieja teoría cuántica” (la teoría un tanto deslavazada anterior a la mecánica cuántica y precursora de ésta, que se desarrolló en el periodo 1900-1925), a la que ambos –sobre todo Einstein- siguieron contribuyendo. De esta teoría, lo más importante fue el modelo atómico del danés Niels Bohr (1913) y la dualidad



partícula onda del aristócrata francés Louis de Broglie (1923). Todo ello culminó con la creación por Werner Heisenberg de la nueva mecánica matricial (1925) y por Edwin Schrödinger de la mecánica ondulatoria (1926). Aunque en principio ambas mecánicas parecían muy distintas, el mismo Schrödinger primero y después el físico inglés Paul A. Dirac, de manera más general, probaron que en realidad eran la misma teoría con formulaciones matemáticas diferentes. Dos años más tarde, en 1928, el mismo Dirac, en un trabajo considerado como uno de los más geniales de la física contemporánea, logró formular una ecuación para el electrón que aunaba la mecánica cuántica y la relatividad y cuya predicción más espectacular fue la existencia de las antipartículas o partículas de antimateria, concretamente de la antipartícula del electrón, el positrón, descubierta por el también británico Anderson en 1932 como componente de los rayos cósmicos. Desde entonces se han encontrado muchas más antipartículas (antiprotón, antineutrón, etc.), de manera que la predicción de Dirac se ha comprobado plenamente.

Desde su creación, la mecánica cuántica fue considerada como una teoría extraña. Ya en 1927, Heisenberg hizo notar una consecuencia de la teoría, conocida como principio de indeterminación o de incertidumbre (no es en realidad un principio, sino algo deducible de las ecuaciones cuánticas), que en su formulación original venía a establecer la imposibilidad de conocer simultáneamente la posición,  $x$ , y el momento,  $p$  (momento = masa x velocidad) de una partícula. Esta imposibilidad no es sólo práctica (como ocurre en mecánica clásica), sino fundamental. Cuantitativamente, la relación de incertidumbre reza  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$ . Poco después, Bohr enmarcaría el principio de Heisenberg en un contexto más amplio, en lo que él llamó, principio de complementariedad, que afirma que ciertas descripciones clásicamente posibles y que en principio serían exhaustivas, es decir, describirían por completo un sistema físico (como la posición y velocidad, o el momento, de una partícula) no pueden darse simultáneamente en mecánica cuántica, sino que son complementarias y cada una de ellas describe facetas del sistema excluyentes entre sí; en general, no es posible conocer todo lo que en principio parecería poder ser conocido, y esto no es una limitación en la práctica, sino

que radica en la verdadera naturaleza de las cosas. Bohr creía que en el principio de complementariedad se resumían todas las peculiaridades de la teoría cuántica. Además, creía que dicho principio era de aplicación universal, traspasando las fronteras de la física hasta llegar a la biología e incluso a la psicología. Sus ideas se hallan claramente expuestas en un artículo titulado "Light and Life" (Luz y Vida), publicado en 1931 en la prestigiosa revista *Nature*. En él se dice:

"Si tratamos de investigar los órganos de un animal, hasta el punto de poder llegar a describir el papel desempeñado por los átomos en funciones vitales, indudablemente hemos de matar ese animal...Según este punto de vista, la existencia de vida puede considerarse como un hecho elemental, que no puede explicarse, sino que ha de tomarse como un punto de partida en Biología, de modo similar a cómo el cuanto de acción, que aparece como un elemento irracional desde el punto de vista de la física clásica, constituye, junto con la existencia de partículas elementales, el fundamento de la física atómica."

En este párrafo, Bohr extrapola demasiado el sentido de la complementariedad, como se ha encargado de demostrar la biología molecular actual. No obstante, es indiscutible la importancia de este principio en la interpretación de la teoría cuántica: No vamos a entrar en esos problemas de interpretación, que han dado lugar a uno de los debates intelectuales más profundos de la historia de la ciencia. Debate que de alguna manera comenzó con las discusiones Bohr-Einstein sobre la cuestión de si el indeterminismo cuántico es esencial, como creía Bohr, o es simplemente aparente, debido a que la mecánica cuántica no sería una teoría completa, como opinaba Einstein ("Dios no juega a los dados"). Este debate, aún presente en muchos foros científicos, no sólo ha tenido importancia, digamos, "filosófica", sino que también ha servido para poner de manifiesto propiedades de la teoría cuántica con relevantes aplicaciones en las ciencias aplicadas y en la tecnología. La más importante de ellas es seguramente el entrelazamiento cuántico, una de las bases de la moderna teoría de la información cuántica. El entrelazamiento cuántico es una manifestación del carácter holístico de la teoría cuántica. Existen ciertos

estados cuánticos, de dos partículas, por ejemplo, en los que las propiedades individuales de cada una de ellas no están definidas mientras que se tiene un conocimiento completo (Bohr prefería el término “exhaustivo”) del sistema total (es decir de las dos partículas globalmente). Estos estados, llamados entrelazados (*entangled*, en inglés) tienen la peculiaridad de que ciertas acciones realizadas sobre una de las partículas son “sentidas “ instantáneamente por la otra, en aparente violación de la teoría de la relatividad, que prohíbe la propagación de acciones dinámicas (señales) a velocidad mayor que la de la luz. Y se ha empleado el término aparente porque puede demostrarse que esta violación no es real, en el sentido de que las citadas acciones no son dinámicas, es decir, no pueden usarse para transmitir señales superlumínicas, con lo que la teoría e la relatividad queda formalmente a salvo, aunque la existencia de estas acciones, digamos fantasmagóricas, a distancia no deje de constituir un misterio aún no aclarado.

#### **4. INFORMACIÓN CUÁNTICA, UN MUNDO AÚN POR ACABAR DE DESCUBRIR**

La teoría de la información “clásica” surgió esencialmente de los trabajos de Claude Shannon en torno a 1950. Por otra parte, la información cuántica, que se viene desarrollando desde hace unos treinta años, posee unas características que la hacen muy diferente de la información clásica (o usual, para entendernos).

El elemento estructural de la información clásica es el bit, término derivado de *binary digit*, que representa una elección entre dos posibilidades, a las que se les asigna el valor uno o cero, respectivamente. Las llamadas puertas lógicas, sobre las que se estructura la información, se construyen a partir de este elemento fundamental. Pues bien, lo que distingue básicamente la información cuántica de la clásica es la existencia en aquélla de un nuevo elemento(o unidad) de información que no tiene imagen en ésta: el *qubit* (por *quantum bit*). Un qubit es una combinación lineal (superposición) de las dos posibilidades (0,

1) anteriores. Este tipo de estado es puramente cuántico, ya que esta superposición es de imposible realización en un mundo clásico, es decir en nuestro “mundo” cotidiano.

La existencia de qubits y el hecho de que puedan combinarse para dar lugar a estados entrelazados da lugar a un abanico de posibles aplicaciones en el campo de la información totalmente desconocidas hasta hace unos años; de ellas, las consideradas más interesantes son la criptografía cuántica y la computación cuántica (ordenadores cuánticos).

Mediante la criptografía cuántica, hoy en día en pleno desarrollo y cuya comercialización a gran escala se producirá seguramente en unos quince años o veinte años, resulta posible enviar y recibir mensajes cifrados con la absoluta seguridad de no poder ser descifrados por terceros. Sin entrar en detalles, puede decirse que el procedimiento se basa en la imposibilidad de saber con certeza –antes de medirlo- el estado de polarización de un fotón (“cuanto de luz”), si éste se ha preparado en una superposición de estados cuánticos. El punto esencial es que si se intenta conocer dicha polarización midiéndola se destruye el estado cuántico (esto es algo que dice con claridad la mecánica cuántica y que está plenamente comprobado). Basándose en esta circunstancia, los principios de la teoría cuántica garantizan la posibilidad de construir una clave indescifrable; y no sólo eso: una hipotética intromisión de un tercero en el proceso de transmisión podría ser detectada por sigilosa que fuera.. Como ya se ha dicho, la tecnología –bastante sofisticada- de la criptografía cuántica se halla en pleno desarrollo y, por ejemplo, ya se han logrado transmitir mensajes seguros, mediante fibra óptica, entre dos puntos situados a más de 50 km entre sí.

La otra gran aplicación de esta nueva rama de la información se concreta en la posibilidad de construir un ordenador cuántico. Debe ante todo advertirse que esto está aún bastante lejos de realizarse, aunque los fundamentos teóricos de la computación cuántica se hallan en un estado muy avanzado. Con un ordenador cuántico sería en principio posible realizar tareas que no podría

llevar a cabo un ordenador convencional (por potente que sea) o que a éste le llevaría un tiempo astronómicamente grande el realizarlas. No podemos entrar, desde luego, en aspectos técnicos, pero sí diré que la esencia del funcionamiento del ordenador cuántico radica en utilizar de manera apropiado los estados cuánticos superpuestos y entrelazados para efectuar acciones en paralelo que un ordenador clásico o convencional tendría que realizar en serie. Al contrario que la criptografía cuántica, como se ha dicho, ya en pleno desarrollo, estamos muy lejos de poder construir un ordenador cuántico. La mayor dificultad radica en la fragilidad de los estados cuánticos necesarios, como se ha dicho, para su funcionamiento. Una mínima perturbación externa destruye la coherencia cuántica entre estados superpuestos (un fenómeno llamado “decoherencia”), pudiendo dar al traste con el proceso que está realizando el ordenador. De todos modos, y a pesar de esta dificultad y de otras dificultades técnicas muy considerables, el proceso de construcción de un ordenador cuántico sigue siendo uno de los principales objetivos en información cuántica, una rama emergente de la teoría cuántica que seguro dará aun sorpresas en el futuro.

Doy las gracias a los organizadores del VI Encuentro de FISEC, en particular a los Dres. Juan Luis Manfredi y Luis Alberto Pérez, por su amable invitación a participar en el mismo, así como por el ambiente agradable (al que sin duda contribuyó la belleza de la ciudad de Málaga) y el interés de la reunión, incluso para alguien como yo profano en el campo de las estrategias de la comunicación

## **BIBLIOGRAFÍA**

Se citarán sólo algunos libros en español de carácter general y de interés para no expertos.

### **Caos determinista:**

Edward N. Lorenz, *La Esencia del Caos* (Debate, Madrid)

David Ruelle, *Azar y Caos* (Alianza Editorial, Madrid)

**Teoría cuántica:**

Tony Hey y Patrick Walters, *El universo cuántico* (Alianza Editorial)

Amir D. Aczel, *Entrelazamiento. El mayor misterio de la física* (Crítica, Barcelona)

Para citar este artículo

**Sánchez-Gómez, José L.** (04-11-2008). LO CUÁNTICO Y LO CAÓTICO: SU IMPACTO EN LO SOCIAL.

FISEC-Estrategias - Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Número 10, pp. 165-178

ISSN 1669- 4015

URL del Documento : <http://www.cienciarred.com.ar/ra/doc.php?n=989>