

COHERENCIAS Y CORRELACIONES CUÁNTICAS EN MATERIA CONDENSADA

por

Luis Quiroga*

Resumen

Quiroga, L.: Coherencias y correlaciones cuánticas en materia condensada. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 411-416. 2005. ISSN 0370-3908.

La búsqueda de manifestaciones cuánticas coherentes a escala macroscópica es actualmente intensa. En especial, con la fabricación de nanoestructuras semiconductoras se ha podido llegar a un nivel de control tanto espacial como temporal donde esos efectos cuánticos asombrosos pudieran ser demostrados. En este artículo se presenta una revisión crítica de resultados recientes sobre la creación de estados cuánticos enredados en sistemas de puntos cuánticos, la observación de su decoherencia en escalas de tiempo del orden de picosegundos, así como también la transferencia de coherencias entre un estado cuántico macroscópico tipo condensado de Bose-Einstein y la luz que emite.

Palabras clave: Enredamiento; nanoestructuras semiconductoras; control coherente.

Abstract

The search for quantum coherent manifestations at a macroscopic length scale is intense nowadays. Specially, based on the fabrication of semiconductor nanostructures is now possible a level of space and time control with which those astonishing quantum effects could be demonstrated. In this paper a critical review on recent results concerning the generation of entangled states in quantum dot systems, the observation of their decoherence on a picosecond scale of time as well as the transfer of coherences from a quantum macroscopic state such as a Bose-Einstein condensate to the light it emits is presented.

Key words: Entanglement; semiconductor nanostructures; coherent control.

Comprender las propiedades del mundo que nos rodea desde el conocimiento básico de que todo objeto material está hecho de partículas (átomos) en perpetuo movimiento, ha sido uno de los mayores logros de la física del

siglo XX. Es así como la teoría que conecta el conjunto de leyes fundamentales de la dinámica y estructura de la materia a escala atómica, la denominada física cuántica, ha demostrado en los últimos 80 años una serie de éxitos

* Departamento de Física, Universidad de los Andes. A.A. 4976, Bogotá D.C.

sin precedentes en la historia de esta ciencia. Es una teoría ampliamente corroborada y en algunos casos con predicciones paradójicas o contra-intuitivas, aunque experimentalmente bien demostradas. El rango de fenómenos a los que ha sido aplicada esta teoría fundamental de la física es enorme. Inicialmente se desarrolló alrededor de los resultados de la espectroscopía atómica, de donde se pasó a comprender el mundo sub-atómico (física nuclear y de partículas) y el mundo supra-atómico (física molecular y del estado sólido). Muchas tecnologías modernas serían imposibles sin la física cuántica: basta recordar que todas las tecnologías informáticas actuales están basadas en el entendimiento cuántico de los semiconductores o que la fabricación de láseres descansa en el conocimiento de los procesos cuánticos elementales de la interacción de la radiación y la materia.

La física cuántica ha representado igualmente una nueva forma de ver el mundo donde las probabilidades, las incertidumbres y las superposiciones representan el conocimiento más profundo y exacto que podemos tener de un sistema físico. Esta nueva perspectiva ha abierto una puerta para entender y manipular la información a un nivel mucho más profundo. De una primera era donde el interés se centró en comprender y explicar las estructuras a nivel atómico estamos entrando en una segunda revolución donde el énfasis está en el control de las correlaciones espaciales y temporales que poseen los sistemas cuánticos. Muy recientemente se han logrado fabricar nanoestructuras de estado sólido que han permitido ampliar el rango de sistemas donde los efectos de las coherencias y correlaciones cuánticas pueden manifestarse a escalas meso- y macroscópica. La interacción de la luz con los sistemas materiales a distintas escalas de tamaño ha sido el elemento clave para comprender los secretos de la naturaleza. En este artículo se pasa revista a algunos de los hitos más importantes en esta búsqueda de efectos de coherencias cuánticas a escala macroscópica a la par que se sintetizan algunos resultados obtenidos por el autor y sus colaboradores en los últimos años, especialmente en el campo de las nanoestructuras semiconductoras en tres frentes: la generación de estados altamente enredados en sistemas de puntos cuánticos, la pérdida de coherencia cuántica en escalas de tiempo ultra-cortas y la transferencia de coherencias cuánticas entre la luz y sistemas de materia condensada.

El efecto de correlaciones cuánticas (o enredamiento, *entanglement*) en las propiedades estructurales y dinámicas de sistemas abiertos de muchas partículas es uno de los problemas que más atención atrae en la actualidad. El enredamiento cuántico es uno de los fenómenos más suti-

les e intrigantes en la naturaleza. A pesar de posibles paradojas que inicialmente se asociaron con el enredamiento cuántico hoy en día se ve como una fuente importante para el procesamiento cuántico de la información (PCI) con aplicaciones ya demostradas en teleportación cuántica, criptografía y codificación densa [Nielsen, 2000]. La física cuántica ha contribuido al desarrollo de la información clásica en al menos dos formas, que pueden ser denominadas evolucionaria y revolucionaria. En la etapa evolucionaria la teoría cuántica ha sido usada como una herramienta para aprovechar ciertas propiedades estructurales de dispositivos que van evolucionando siempre hacia escalas de dimensiones más reducidas. Por el contrario, en la etapa revolucionaria la física cuántica aporta nuevas y radicalmente diferentes formas de manipular la información en la medida en que en lugar de mejorar dispositivos ya existentes propone dispositivos que manejan la información de acuerdo con las leyes físicas más fundamentales. Podemos decir que estamos entrando en la era de la tecnología cuántica. El enredamiento, el paradigma de las correlaciones puramente cuánticas, es entonces un nuevo recurso que como magnitud física que es, admite ser cuantificado y transformado.

Sin embargo, el enredamiento cuántico es una propiedad muy frágil, que puede ser destruida por la interacción del sistema de interés con el medio. Este proceso de pérdida de enredamiento se ha denominado decoherencia. Este efecto es el principal obstáculo para el desarrollo práctico del PCI. En general, la decoherencia es un proceso muy rápido que depende esencialmente del tamaño y de la temperatura del sistema de interés, pero que también depende de otros factores como pueden ser una preparación imperfecta del estado cuántico y ruido en general. Además, es la decoherencia la responsable de la aparición de comportamientos clásicos en sistemas cuánticos. Un aspecto importante del grado de desarrollo que ha alcanzado la física actual es que se ha pasado del debate puramente filosófico sobre la frontera entre los mundos clásicos y cuánticos, a la planeación y ejecución de experimentos controlados con el fin de precisar esa frontera.

Existe un creciente interés por explorar las conexiones entre la teoría cuantitativa del enredamiento y las propiedades de sistemas de materia condensada [Leggett, 2002; Osborne, 2002]. Entre los problemas considerados hasta ahora deberían mencionarse aquellos relacionados con la conexión del enredamiento cuántico con el orden de largo alcance y la ruptura espontánea de simetría [Shi, 2003]. El enredamiento aparece en forma natural en física de materia condensada a baja temperatura. Es el responsable de muchos aspectos importantes en estos sistemas, tales como

correlaciones de largo alcance que caracterizan una transición de fase, pero es al mismo tiempo, su estructura complicada uno de los obstáculos más fuertes para estudios numéricos [Reslen, 2005]. Por lo tanto, es un problema muy importante en la actualidad, explorar estos sistemas donde el enredamiento se presenta en forma natural, con el propósito ya sea de manipularlo con fines de PCI o para ganar comprensión de mecanismos físicos que puedan ser usados para enredar un gran número de subsistemas cuánticos. Es importante también resaltar que desde el punto de vista de la física fundamental el estudio del enredamiento en sistemas de muchas partículas ofrece la oportunidad de explorar otros aspectos complementarios de la física tradicional de materia condensada, que permitan ganar en la comprensión de fenómenos cuánticos macroscópicos como la superconductividad, la superfluidez, efectos Hall cuánticos y transiciones de fase en general. Con respecto a este último tópico ha sido de interés revisar el concepto de universalidad entre distintos sistemas físicos que poseen leyes de escalamiento idénticas en cercanías de un punto crítico. El estudio de las leyes de escalamiento universal que sufre el enredamiento, como nueva magnitud física medible, ha sido demostrado por nosotros en el caso de dos sistemas aparentemente bien distintos: un sistema de materia y radiación en interacción por un lado y un sistema puramente magnético formado por partículas con spin [Reslen, 2005]. Este estudio permite anticipar que las distintas clases de universalidad bien establecidas en la física estadística de las transiciones de fase pueden presentar aspectos novedosos cuando el enredamiento deba ser tenido en cuenta. Por lo tanto, la noción de enredamiento cuántico en sistemas macroscópicos permite dar nueva luz a viejos problemas de transiciones de fase e investigar la frontera entre los mundos clásicos y cuánticos, así como posiblemente también pueda dar indicaciones sobre el proceso mismo de la medición cuántica.

Realizaciones concretas en materia condensada donde diversos aspectos del enredamiento cuántico han sido explorados tanto teórica como experimentalmente son los sistemas de puntos cuánticos (QDs) [Quiroga, 1999]. Un QD aislado es muy similar a un átomo individual, y experimentos similares pueden ser realizados en este sistema conveniente de materia condensada como los ya realizados en física atómica [Gammon, 2002]. Varios de estos experimentos han usado QDs ya sea del tipo auto-ensamblados o formados como islas en pozos cuánticos ultradelgados [Bonadeo, 1998; Heller, 1997; Gammon, 1997; Cundiff, 1996; Brown, 1996]. Como el tamaño de un QD es comparable con la longitud de onda de de Broglie de los portadores (electrones/huecos), sólo ciertos valores discretos de energía son permitidos. La ventaja de tener

una densidad discreta de estados se ve degradada por variaciones en los tamaños de los QDs que lleva a un ensanchamiento inhomogéneo de las líneas espectroscópicas. Para recuperar líneas espectrales homogéneas y angostas se debe aislar un QD. Esto ya se ha logrado con diferentes técnicas de micro-aperturas y excitaciones espacialmente selectivas. Con base en estos resultados experimentales se ha propuesto usar sistemas de dos y tres QDs acoplados entre sí por interacciones resonantes tipo Forster para generar en ellos, por medio de la excitación con luz coherente (láser), estados con máximo enredamiento como son los estados de Bell (2 QDs) y estados de Greenberger-Horne-Zeilinger (3 QDs) [Quiroga, 1999]. Esta propuesta inicial ha sido aceptada y ampliada por múltiples autores en años recientes [Biolatti, 2000; Nazir, 2004]. Entre las ventajas que tiene el usar estados altamente enredados en sistemas de materia condensada está la posibilidad de explotarlos no sólo con fines prácticos en criptografía y teleportación cuánticas, sino también de explorar los fundamentos de la teoría cuántica, como la violación de desigualdades de Bell y correlaciones GHZ, en sistemas altamente controlados y familiares como son los semiconductores.

Junto con los avances en la fabricación de QDs individuales, una nueva área de estudio se ha abierto con la inmersión de estos QDs en microcavidades semiconductoras. Localizar una pequeña cavidad óptica alrededor de un QD modifica la densidad de modos ópticos, cambiando de esta forma la rata y el patrón de emisión espontánea [Messin, 1999]. Para efectuar este cambio, se añade un par de reflectores distribuidos de Bragg alrededor de los QDs. Es posible también fabricar cavidades en forma de microdiscos que confinan los modos ópticos en las 3 dimensiones. Se tiene así, un sistema interactuante formado por pares electrón-hueco (excitones) y fotones confinados. En un régimen de débil acoplamiento entre radiación y materia, el principal fenómeno de interés es la modificación de la recombinación espontánea. En el régimen de fuerte acoplamiento ocurren fenómenos novedosos debido a la creación de nuevas excitaciones colectivas. Por medio de la interacción de excitones en QDs con el modo cuantizado de la radiación en la cavidad es posible manipular el estado cuántico del campo en la cavidad [Andrews, 1999; Andreani, 1999]. Se ha demostrado que iniciando con un campo vacío de fotones se puede preparar un estado arbitrario del campo con la interacción sucesiva con sistemas de dos niveles (excitones, por ejemplo). De igual manera el estado de la microcavidad puede determinar el tipo de enredamiento que se puede lograr entre los excitones en puntos cuánticos. Los QDs deberían prepararse inicialmente en una superposición adecuada de estados a cero y un

excitón, antes de que interactúen con el campo. Es posible generalizar esta idea a complejos excitónicos más realistas con más de dos estados. En las referencias [Olaya-Castro, 2004; Olaya-Castro, 2004] se demuestra el tipo de acción catalítica que una microcavidad puede jugar para acelerar la creación de enredamiento entre sistemas de dos niveles (átomos, iones, excitones en puntos cuánticos, SQUIDS superconductores). Si inicialmente se tiene cero fotones en la cavidad al final del proceso el estado de la radiación confinada queda inalterado. Todo el efecto de la microcavidad se ha reducido a permitir el enredamiento entre los sistemas materiales en interacción con ella.

Las coherencias cuánticas son de muy corta vida. En nanoestructuras semiconductoras el tiempo de decoherencia de excitones es del orden de decenas de picosegundos (10^{-12} segundos). En espectroscopía de QDs individuales, han sido medidos tiempos de decoherencia de 40 picosegundos, lo que permite el control conveniente de estos sistemas con pulsos ópticos de sólo unos cuantos femtosegundos (10^{-15} segundos), una técnica denominada espectroscopía ultrarápida. Entre las varias oportunidades que este tipo de espectroscopía brinda, una de ellas es la de disponer de QDs como unidades lógicas básicas para PCI. En este régimen ultrarápido, la duración finita de un evento de dispersión lleva necesariamente a comportamientos cualitativamente nuevos: la dinámica es No-Markoviana (efectos de memoria son importantes), los procesos de dispersión no se pueden considerar como irreversibles y la conservación de la energía en procesos individuales es violada debido a incertidumbres energía-tiempo. Estudios sobre efectos híbridos de decoherencia o disipación junto con efectos de memoria en la dinámica ultrarápida en nanoestructuras semiconductoras han sido señalados en [Rodríguez, 2002; Quiroga, 2004 y Reyes, 2004] donde se presentan resultados que muestran los efectos de correlaciones inter-partículas como excitones y biexcitones en puntos cuánticos y su decaimiento en una escala de decenas de picosegundos teniendo en cuenta una dinámica coherente ultrarápida con efectos de memoria (efectos no-Markovianos). Se demostró que las técnicas usuales para trabajar estos fenómenos en términos de un único tiempo característico de decaimiento (aproximación Markoviana) y aproximaciones de campo medio, son incapaces de detectar los efectos debidos a superposiciones cuánticas en tiempos muy cortos, y que aún más, tienden a sobrevalorar los efectos de la decoherencia. La respuesta fluorescente del sistema de QDs es igualmente sensible, en el régimen no-Markoviano, al estado inicial de preparación de los QDS, permitiendo de esta forma acceder a una magnitud física que sirva de diagnóstico o testigo de la posible existencia

previa de superposiciones o enredamiento [Rodríguez, 2002]. La manipulación de estos estados colectivos con haces ultra-cortos de luz láser permitirá proponer regímenes de parámetros realistas donde la generación de enredamiento cuántico en nanoestructuras semiconductoras y microcavidades sea factible.

Estas nuevas formas de espectroscopía están siendo igualmente explotadas en el estudio de excitones y polaritones (estados superpuestos de excitones y fotones) en nanoestructuras y microcavidades semiconductoras. A bajas densidades, se espera que los excitones o polaritones se comporten de acuerdo con la estadística de Bose-Einstein. La condensación de Bose-Einstein es uno de los fenómenos colectivos más asombrosos en física. Cuando un conjunto de bosones se lleva a temperaturas por debajo de la denominada temperatura crítica, un número macroscópico de ellos ocupará simultáneamente un mismo estado individual. Este fenómeno, asociado a una ruptura espontánea de simetría, lleva a otro no menos asombroso: la superfluidez [Stamer-Kurn, 1998]. Efectos bosónicos similares ocurren en sistemas de excitones y polaritones. Dado que estos últimos están formados por excitones y fotones, y los excitones terminan convirtiéndose en luz, un condensado de polaritones corresponde finalmente a un estado coherente de energía óptica. Pero debido a que los polaritones tienen una masa finita, ellos se mueven mucho más lentamente que los fotones, y se condensan a muy bajas temperaturas en un estado coherente. Una forma de observar este condensado es buscar señales que correspondan a la coherencia óptica de la luz emitida [Olaya-Castro, 2001; Quiroga, 2002; Olaya-Castro, 2003]. Se demostró en estas investigaciones que a tiempos del orden de femtosegundos la luz emitida por el condensado guarda memoria de la coherencia propia del sistema condensado, y por lo tanto esta característica puede ser utilizada como un indicador de una fase coherente macroscópica de la materia excitónica en semiconductores. Igualmente se ha encontrado en este tipo de estudios que la luz emitida posee características no-clásicas como la de estar "comprimida" (*squeezed*) en una de sus cuadraturas. Este resultado permitirá usar los sistemas de condensados en semiconductores como elementos fundamentales en la detección de señales muy débiles por debajo del límite de Heisenberg.

En este artículo se ha evitado toda discusión de manifestaciones cuánticas en superconductores, materiales muy importantes tanto por razones tecnológicas como por sus propiedades físicas intrínsecas sorprendentes. Tampoco se ha entrado en consideraciones sobre la importancia de los sistemas superconductores para explorar posibles lí-

mites macroscópicos de validez de la física cuántica [Leggett, 2002]. En cualquier tipo de sistema de materia condensada que se considere será interesante en el futuro ver experimentos donde se manifiesten claramente las correlaciones cuánticas en objetos de tamaños cada vez más grandes. Todos estos tópicos, muy importantes, interesantes y en activo desarrollo, permitirán eventualmente manipular en forma controlada las coherencias cuánticas en el mundo macroscópico. De las anteriores consideraciones, es claro que para controlar coherencias cuánticas en la vida real o cotidiana, se debe emprender una acción multidisciplinaria entre distintas áreas de la física moderna que han permanecido en desarrollo independiente hasta ahora: se requieren conocimientos y técnicas provenientes de varios campos que combinen esencialmente herramientas de la física mesoscópica de la materia condensada con aquellas propias de la óptica cuántica. Precisamente con esta idea de integrar conocimientos de distintas áreas de la física se ha centrado el autor en la investigación de los fenómenos coherentes en sistemas de materia condensada en unión con fuentes cuánticas de luz, donde, dado que cualquier coherencia cuántica es transitoria, es muy interesante estudiar el proceso dinámico de la decoherencia que ocurre en tales nanoestructuras fotónicas. Es este un tema que atrae actualmente un gran interés a nivel mundial tanto por la física fundamental que contiene como por las aplicaciones prácticas concretas.

Las aplicaciones, reales y potenciales, de estos nuevos campos están hoy en día en todas partes. El desarrollo conjunto de la electrónica y la fotónica puede revolucionar la tecnología como lo hizo hace más de 50 años el transistor. Los láseres semiconductores y las fibras ópticas son hoy en día las dos principales tecnologías de la revolución en telecomunicaciones, y el desarrollo de técnicas experimentales en la práctica médica y en otras áreas tecnológicas no ha dejado de crecer. Nuevas formas del tratamiento de la información están surgiendo, donde aspectos cuánticos fundamentales de las nanoestructuras semiconductoras como su capacidad de enredamiento controlado, estabilidad a tiempos muy cortos, interfaces con fotones individuales, entre otras posibilidades, podrían ser explotados en protocolos de criptografía cuántica en sistemas de estado sólido. De igual manera se espera que la capacidad de miniaturización de los sistemas semiconductores abra en un futuro cercano la posibilidad de un gran nivel de escalamiento de dispositivos cuánticos para ensamblar compuertas lógicas cuánticas y por qué no, enfrentar exitosamente el gran reto actual, como es la construcción de un computador cuántico. Es por lo tanto un camino que sin duda estará lleno de sorpresas pero también de promesas hechas realidad, el que espera a los

científicos dedicados a la investigación de las manifestaciones de las coherencias cuánticas a escala macroscópica.

Los resultados comentados en este artículo no habrían sido posibles sin la colaboración a lo largo de muchos años con los colegas y amigos Ferney J. Rodríguez, Neil F. Johnson y Carlos Tejedor. Igualmente debo mucho a aquellos estudiantes que se han arriesgado a hacer sus trabajos de tesis conmigo, en especial a Alexandra Olaya-Castro, Jorge Villalobos, José Reslen, Iván Zalamea, Álvaro Pedraza y Claudia Ojeda, entre otros.

Bibliografía

- Andreani L.C., G. Panzarini & J.-M. Gerard, 1999. Strong-coupling regime for quantum boxes in pillar microcavities: theory, Phys. Rev. **B60**: 13276-13279.
- Andrews J.T., P. Sen & R.R. Puri, 1999. Optical absorption spectra of a quantum dot in a microcavity, J. Phys.: Cond. Matter **11**: 6287-6300.
- Biolatti E., R.C. Iotti, P. Zanardi & F. Rossi, 2000. Quantum-information processing with semiconductor macroatoms, Phys. Rev. Lett. **85**: 5647-5650.
- Bonadeo N.H., J. Erland, D. Gammon, D. Park, D.S. Katzer & D.G. Steel, 1998. Coherent optical control of the quantum state of a single quantum dot, Science **282**: 1473-1476.
- Brown S.W., T.A. Kennedy, D. Gammon & E.S. Snow, 1996. Spectrally resolved overhauser shifts in single GaAs/AlGaAs quantum dots, Phys. Rev. **B54**: R17339-R17342.
- Cundiff S.T., M. Koch, W.H. Knox, J. Shah & W. Stolz, 1996. Optical coherence in semiconductors: strong emission mediated by nondegenerate interactions, Phys. Rev. Lett **77**: 1107-1110.
- Gammon D., S.W. Brown, E.S. Snow, T.A. Kennedy, D.S. Katzer & D. Park, 1997. Nuclear spectroscopy in single quantum dots: nanoscopic raman scattering and nuclear magnetic resonance, Science **277**: 85-88.
- _____ & D.G. Steel, 2002. Optical studies of single quantum dots, physics today **55**(10): 36-41.
- Heller W. & U. Bockelmann, 1997. Magneto-optical studies of a single quantum dot: excited states and spin flip of excitons, Phys. Rev. **B55**: R4871-R4874.
- Leggett, A.J., 2002. Testing the limits of quantum mechanics: motivation, state of play, prospects, J.Phys.: Cond. Matter **14**: R415-R451.
- Messin G., J. Ph. Karr, H. Eleuch, J.M. Courty & E. Giacobino, 1999. Squeezed states and the quantum noise of light in semiconductor microcavities, J. Phys.: Cond. Matter **11**: 6069-6078.
- Nazir A., B.W. Lovett, S.D. Barrett, T.P. Spiller & G.A.D. Briggs, 2004. Selective spin coupling through a single exciton, Phys. Rev. Lett. **93**: 150502 (4 pages).
- Nielsen M.A. & I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).

- Olaya-Castro A., F.J. Rodríguez, L. Quiroga & C. Tejedor**, 2001. Restrictions on the coherence of the ultrafast emission from an electron-hole pairs condensate, *Phys. Rev. Lett.* **87**: 246403 (4 pages).
- , **L. Quiroga & C. Tejedor**, 2003. Coherence properties of a radiating electron-hole condensate, *Solid State Commun.* **127**, 141.
- , **N.F. Johnson & L. Quiroga**, 2004. Dynamics of quantum correlations and linear entropy in a multi-qubit-cavity system, *J. Optics B: Quantum and Semiclass. Optics* **6**: S730-S735.
- , **N.F. Johnson & L. Quiroga**, 2004. Scheme for on-resonance generation of entanglement in a time-dependent asymmetric two-qubit-cavity system, *Phys. Rev.* **A70**, R020301 (4 pages).
- Osborne T.J. & M.A. Nielsen**, 2002. Entanglement in a simple quantum phase transition, *Phys. Rev.* **A66**, 032110 (14 pages).
- Quiroga L. & N.F. Johnson**, 1999. Entangled bell and ghz states of excitons in coupled quantum dots, *Phys. Rev. Lett.* **83**: 2270-2273.
- , **A. Olaya-Castro, F.J. Rodríguez & C. Tejedor**. 2002. Ultrafast optical coherence transfer from an electron-hole-pair condensate, *Proceedings of the ICPS-26, Edinburgh, UK.*
- , **F.J. Rodríguez & N.F. Jonson**, 2004. Non-markovian signatures of quantum superposition states in a nanostructure, *Microelectronics Journal* **35**: 95-96.
- Reslen, J., L. Quiroga & N.F. Johnson**, 2005. Direct equivalence between quantum phase transition phenomena in radiation-matter and magnetic systems: scaling of entanglement, *Europhysics Letters* **69**: 8-14.
- Reyes A., F.J. Rodríguez & L. Quiroga**, 2004. Ultrafast non-linear optical signal from a single quantum dot: exciton and biexciton effects, *Journal of Physics: Condensed Matter* **16**: 6185-6193.
- F.J. Rodríguez, L. Quiroga & N.F. Johnson**, 2002. Ultrafast optical signature of quantum superpositions in a nanostructure, *Physical Review* **B66**, 161302Rapid Communication (4 pages).
- Shi Y.**, 2003. Quantum disentanglement in long-range orders and spontaneous symmetry breaking, *Phys. Lett.* **A309**: 254-261.
- Stamper-Kurn D.M., M.R. Andre'**

Recibido el 7 de febrero de 2005

Aceptado para su publicación el 4 de abril de 2005