

El punto cuántico en la nanociencia y la nanotecnología

J. Giraldo^{1,*}

¹ Grupo de Física de la Materia Condensada, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, A.A. 607 39, Bogotá, Colombia

Resumen

Con el surgimiento de la teoría cuántica, a comienzos del siglo XX, se partió en dos la historia de la humanidad. Más revolucionaria que la teoría de la relatividad, la otra gran pieza clave de la física heredada del siglo pasado, esta última fue su aderezo. El espín, de origen relativista y desde entonces identificado como una propiedad intrínseca de todo tipo de partículas, el fotón, mediador de la interacción electromagnética, el electrón, descubierto justo a finales del siglo XIX, fueron esenciales para la tecnología del siglo anterior materializada en la microelectrónica, en la iniciación de la conquista del llamado espacio exterior y principalmente en el descubrimiento del ciberespacio.

Gracias a la mecánica cuántica pudimos entender la tabla de los elementos químicos, acceder al mundo de las llamadas partículas elementales, iniciar con éxito la carrera por arrebatar los secretos del código genético y hacer realidad la creación de vida en el laboratorio. Pero las aplicaciones más revolucionarias de aquella teoría, a saber la computación cuántica, la criptografía cuántica y la teleportación cuántica, apenas se están iniciando en el presente siglo. No podríamos ni enumerar siquiera en el espacio razonable de un breve artículo divulgativo los más revolucionarios cambios logrados en un siglo de convivencia con los fenómenos cuánticos.

Después de un breve repaso histórico-conceptual, mencionaremos brevemente algunas de las aplicaciones prácticas de la teoría cuántica que han sido más relevantes para la optoelectrónica y hablaremos de los nuevos átomos artificiales, también llamados puntos cuánticos. Ellos son apenas el comienzo de una ciencia interdisciplinaria que abarca campos tan disímiles como la medicina y la ingeniería de materiales; la nanoescala ha abierto nuevos frentes en física, química y biología. A vuelo de pájaro mencionaremos algunas perspectivas de la nanotecnología; particularmente nos referiremos a los nanoláseres, los nanotransistores y a otras aplicaciones inmediatas de la nanociencia, a sus ya probados éxitos en biotecnología y en semiconductores.

Palabras claves: nanotecnología, nanociencia

*: jjgiraldog@unal.edu.co

1. Introducción

El 14 de diciembre de 1900 Max Planck anunció ante una muy selecta pero escéptica audiencia de la Sociedad Alemana de Física su hipótesis desesperada sobre la cuantización de la energía en el proceso de absorción y emisión de radiación electromagnética del denominado cuerpo negro. Era desesperada porque sus cálculos no le cuadraron en ninguna otra forma. “Es posible que ninguno de los presentes, ni siquiera él mismo, pudiera intuir que (en aquellos momentos) estaba naciendo una nueva era científica y tecnológica” [1]. Durante las tres décadas siguientes los científicos europeos y unos pocos americanos y asiáticos no solo dieron sustento a su expresión analítica mejor conocida como ley de radiación del cuerpo negro sino que desarrollaron dos versiones, a falta de una, de la denominada teoría cuántica: matricial y ondulatoria. La formulación matricial, inicialmente propuesta por Werner Heisenberg y desarrollada también por Paul A. M. Dirac y Wolfgang Pauli, pudo ir más lejos. Pero la mecánica ondulatoria, debida a Erwin Schrödinger, sigue siendo herramienta fundamental en el análisis e interpretación de muchos fenómenos cuánticos consuetudinarios, entre ellos el efecto túnel y el fenómeno de la no localidad. No me preocuparé en esta exposición por el elegante formalismo cuántico, solamente por algunas de sus consecuencias, resaltando de paso su belleza conceptual y su impresionante generalidad. Recomiendo al lector algunos textos básicos divulgativos [1]–[4] y otros de carácter introductorio [5]–[7].

La fórmula original propuesta por Planck para un caso particular fue útil también en otros terrenos. El resultado, conocido universalmente como “cuantización de la energía de los osciladores”, se extendió a los fenómenos ondulatorios: la luz, por ejemplo, está cuantizada en paquetes “discretos” (valga la redundancia), denominados fotones; a su vez el sonido lo está en fonones. Uno habla entonces de la cuantización de la radiación o del campo electromagnético (en general, de todos los campos de interacción: es la teoría cuántica de campos), de la cuantización de las vibraciones de la red cristalina, de la cuantización de los modos de vibración del plasma (plasmones), etc.

Surgen también magnones, polaritones, solitones y entes similares sobre los cuales no diremos nada más allá de mencionarlos, para no salirnos del tema central de estas notas. A los excitones, átomos hidrogenoides que aparecen en las excitaciones de los semiconductores, esenciales circunstancialmente en la electrónica iniciada con los diodos y los triodos (transistores), todavía más importantes en la reciente era de la microelectrónica, ahora actores principales en la nano-optoelectrónica del siglo XXI, tendremos que contentarnos con dedicarles muy breve espacio. El nuevo panorama es demasiado amplio.

2. Conceptos básicos

Me limito a suministrar aquí, sin deducción, algunas expresiones fundamentales. El punto de partida puede ser la expresión que relaciona el cambio en la energía (cuantizada) envuelta en cada uno de los procesos arriba mencionados y otros más con la frecuencia ν correspondiente a la oscilación o radiación clásica respectiva: $\Delta E = h\nu$. Por obvias razones h se denomina constante de Planck y es, dicho sea de paso, una “constante fundamental” (Las otras son la velocidad de la luz en el vacío, c , y la masa del electrón, m_e .)

Tratando de entender los espectros discretos de los elementos (emisión y absorción de luz), Niels Bohr extendió el concepto de energía cuantizada al átomo. Supuso que el electrón solo puede ocupar ciertas “órbitas”, discretamente, y que las demás le estarían vedadas. A cada órbita correspondería un nivel o “escalón” de energía. El paso de uno a otro escalón se haría por saltos. Ya para entonces Einstein había supuesto que la radiación electromagnética estaba cuantizada y que cada “paquete” de energía (fotón) tenía el valor arriba expresado. ($E = h\nu$, siendo ν la frecuencia de la luz correspondiente: fue así como explicó el hasta entonces enigmático efecto fotoeléctrico, haciéndose con ello acreedor al premio Nobel). Así que el paso siguiente era lógicamente suponer que cuando los electrones “subían” de un nivel a otro era porque habían absorbido un paquete o fotón de luz. Ese *estado cuántico*, como se le conoce en la nueva jerga, es un estado excitado, por tanto no estable o no estacionario. La forma de “decaer” el electrón a su anterior estado, estado base, es precisamente emitiendo un fotón de la misma frecuencia que el fotón absorbido. Nótese que una vez más $\Delta E = h\nu$, siendo ΔE el cambio en la energía del electrón al pasar éste de un estado a otro. Einstein fue un poco más lejos y pudo deducir, a partir de la absorción de luz por los átomos, las expresiones básicas que determinan tanto la emisión espontánea que acabamos de describir como la emisión inducida, la que origina el decaimiento en cascada y coherente de un conjunto de átomos, por tanto el rayo láser: la luz más coherente que puede obtenerse, con las enormes aplicaciones por todos conocidas.

Todo lo anterior puede deducirse limpiamente de la teoría cuántica en cualquiera de sus dos versiones, la ondulatoria y la matricial, pues son equivalentes. Pero para elaborar la teoría y avanzar era necesario una suposición todavía más drástica: así como el fotón, “partícula de luz”, tiene asociada una onda con frecuencia ν y por lo tanto longitud de onda λ (recuérdese que $c = \nu\lambda$), el electrón en sus “órbitas” atómicas o en cualquier estado en que se encuentre tendrá siempre asociada una “onda piloto” con longitud de onda λ . Si el electrón estuviera “libre” (por oposición a “ligado”, como ocurre por ejemplo en el átomo), moviéndose con rapidez uniforme v , su correspondiente longi-

tud de onda estaría relacionada con su cantidad de movimiento mediante una expresión que se obtiene fácilmente de la teoría especial de relatividad y de la fórmula anterior aplicada a la energía del fotón: $\lambda = h/p = h/m_e v$. Esta relación vale para toda partícula material y la comprobación experimental de tan atrevida hipótesis, propuesta por Louis de Broglie, hizo que tanto a su autor como a su “verificador”, George Pawel Thomson, se les adjudicara el premio Nobel. Es curioso que Joseph John Thomson, el descubridor del electrón, por tanto quien detectó la primera partícula elemental en la física, hubiera recibido el galardón por demostrar que los rayos catódicos eran en realidad corpúsculos y que hubiera sido su hijo George Pawel quien comprobara experimentalmente que tales “partículas” tienen también un comportamiento ondulatorio. Puede decirse que su hijo es el padre del microscopio electrónico, aunque nadie le haya hecho este reconocimiento. No está por demás subrayar que todos los personajes hasta aquí mencionados se hicieron acreedores a tan codiciada presea.

Los estados excitados y, en general, cualquier estado no estacionario, tienen un tiempo de vida finito. Designémoslo por Δt . Si la diferencia de energía entre éste y el estado excitado es ΔE , se debe cumplir siempre que $\Delta E \Delta t \geq h$. Este es el famoso *principio de incertidumbre* de Heisenberg, el cual vale también para el producto de las “incertidumbres” en la posición y la cantidad de movimiento de todo cuerpo material. $\Delta x \Delta p \geq h$. (En general el mismo tipo de relación vale para cualquier pareja de “variables conjugadas”).

3. Un microscopio muy singular

Los átomos de los elementos simples no son los únicos que poseen estados cuánticos. Cualquier sistema físico tiene unos *niveles de energía* o *estados cuánticos* permitidos. En general, esos valores de energía permitidos son discretos, como discretas son en principio todas las cantidades físicas que nos sirven para describir el estado de un sistema físico cualesquiera. El espín de un electrón es un ejemplo de estados con dos únicos posibles valores: espín hacia arriba o espín hacia abajo. Dos electrones pueden combinarse para dar lugar a espín total cero o espín total uno. (Cada electrón tiene espín $1/2$, o más exactamente $\hbar/2$; \hbar , la unidad de momentum angular, es igual a $h/2\pi$.) Pero el valor 1 para el espín de dos electrones puede resultar de tres distintas configuraciones, por lo que ese estado múltiple se denomina un *estado triplete*. El de espín cero se denomina *singlete*.

Dejemos de lado estas complicaciones, supremamente útiles como veremos luego, y centrémonos por un momento en algo análogo a lo que pa-

sa a nivel de los átomos, pero en una escala ligeramente mayor. Después de más de medio siglo de aplicaciones de la teoría cuántica, justamente 60 años desde cuando pudieron “verse” por primera vez los átomos en el microscopio electrónico, finalmente los físicos experimentales aprendieron a manipular aquellos. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 1, en donde se intenta representar la idea básica: con la punta del llamado microscopio de tunelamiento cuántico o STM, punta metálica terminada esencialmente en un átomo, se “golpea” a los átomos depositados sobre una superficie como si fueran boliches y se les coloca finalmente en la posición deseada. Por supuesto los átomos depositados no deben reaccionar químicamente con la superficie, ni siquiera adherirse fuertemente. En esta operación estamos utilizando la punta como si fuera una especie de “taco de billar”. Su uso inicial fue otro. Efectivamente, a comienzos de los ochenta se desarrolló la herramienta más poderosa de que disponemos hoy en día, veinte años después, para observar y organizar casi a voluntad átomos individuales.

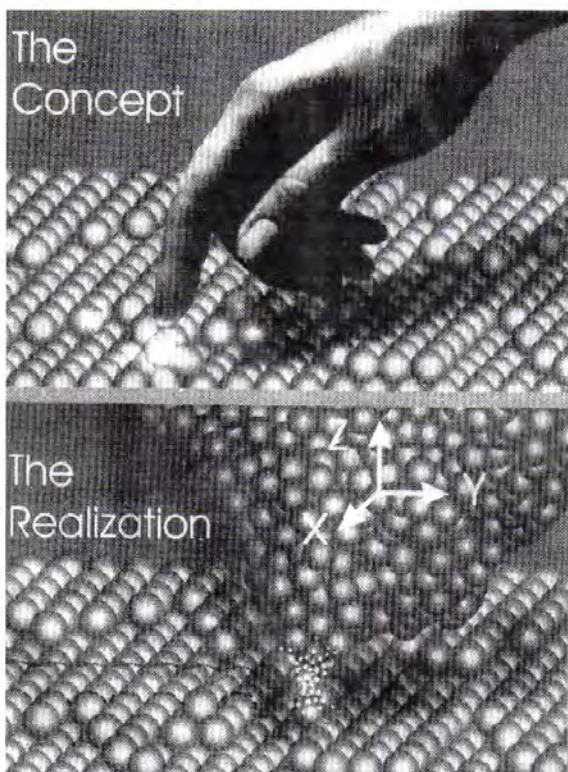


Figura 1. Esquema de cómo se utiliza la punta de un microscopio de tunelamiento para mover átomos sobre una superficie golpeándolos y acomodándolos poco a poco.

El STM (por sus siglas en inglés, *scanning tunnelling microscope*; el “escanéo” es esencial) se esquematiza en la figura 2. Su antecesor, el *microscopio electrónico a secas* (en sus dos versiones: el de barrido, SEM, y el de transmisión, TEM) data de los años treinta.

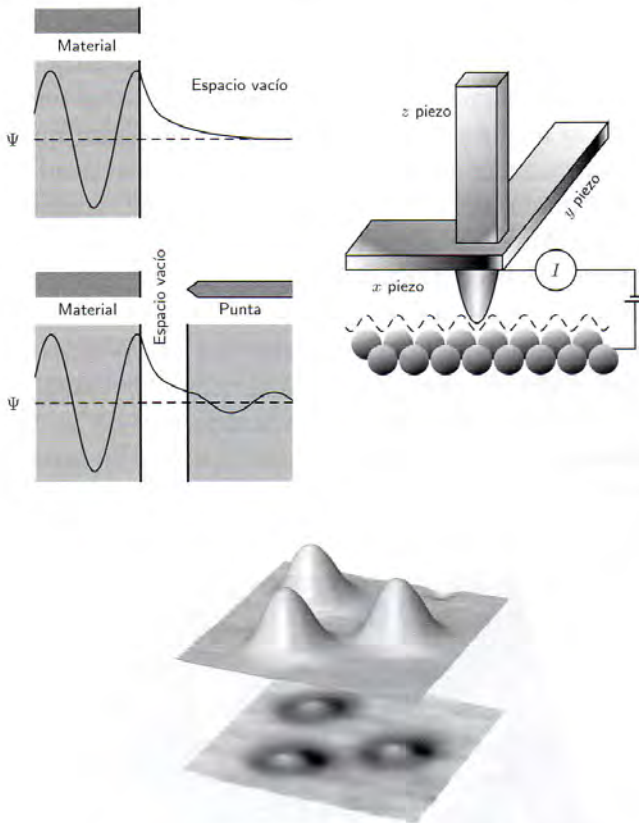


Figura 2. Esquema de funcionamiento del STM o microscopio de tunelamiento con barrido que funciona por tunelamiento cuántico. En la parte inferior, topografía de tres átomos de gadolinio sobre la superficie (1 1 0) de niobio [9].

Obviamente el hecho de que pudiera diseñarse un microscopio electrónico, más poderoso que el microscopio óptico, tiene que ver con la propiedad del electrón de comportarse como una onda, al igual que la luz. Y de tener una longitud de onda, a temperatura ambiente, menor que la de los rayos X. (Acelerados a decenas de miles de voltios, tienen una longitud del orden de 0,005 nm). Pero el fundamento del *microscopio de tunelamiento* es diferente: gracias al principio de incertidumbre, un electrón puede temporalmente “burlarse” del principio de conservación de la energía y hacer lo que se denomina precisa-

mente tunelamiento, un efecto puramente cuántico. Basta con que el electrón disponga de un intervalo de tiempo finito Δt que satisfaga la relación de incertidumbre de Heisenberg. Conceptualmente es más fácil suponer que el electrón es una onda que incide desde la izquierda sobre lo que denominaremos una barrera de potencial: si su energía es menor que la altura de la barrera, clásicamente no podrá “cruzar” dicha barrera. Pero por la propiedad de las ondas, la “función de onda” del electrón, su “frente de onda” en lenguaje clásico, puede dividirse en dos partes, como lo hacen las ondas al atravesar un bloque de parafina: una parte se refleja y otra parte se transmite. La parte que se transmite contribuye a una corriente que puede detectarse. La intensidad de la corriente graficada en términos del potencial nos permite “ver” la parte del electrón que se transmitió. (Más exactamente, nos permite “medir” la probabilidad de transmisión de un electrón. Téngase en cuenta que los electrones que participan son más de 10^{12} , pueden ser 10^{22} . En el caso de la luz, el número de fotones que usualmente participa es mayor en 10 o más órdenes de magnitud). Por simplicidad, podemos suponer que esa barrera de potencial sólo depende de la separación entre la punta de la aguja y la superficie que se está “escanando”. Así es como se revela la topografía de la superficie en la parte inferior de la figura 2.

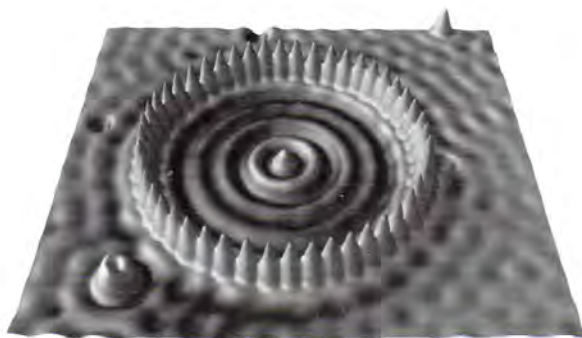


Figura 3. Corral cuántico: 48 átomos de hierro sobre una superficie de cobre. Nótese el carácter ondulatorio de los electrones en el interior del corral, produciendo interferencia destructiva en algunas regiones (franjas oscuras) [9].

En 1993 se logró visualizar la aparentemente compleja situación que se muestra en la figura 3 utilizando el STM en su doble funcionalidad. Por un lado, la punta del microscopio de tunelamiento sirvió para acomodar pacientemente, uno a uno, 48 átomos de hierro sobre una superficie de cobre formando una circunferencia. Por el otro, una vez lograda la configuración, se procedió al “escaneo” para ubicar la posición de electrones dentro y fuera de lo que con

sobrada razón se denomina *el corral cuántico*. A la luz de la teoría cuántica, la interpretación de la figura es muy simple: los electrones dentro del corral forman claras franjas de interferencia, evitando estar donde la función de onda lo prohíbe; en esos lugares hay interferencia destructiva. En cambio se ubican en círculos de interferencia constructiva. Particularmente alta es la probabilidad de encontrarlos justo sobre los átomos de hierro.

4. Átomos y moléculas artificiales

El corral cuántico es una forma arquitectónicamente muy elaborada de átomo artificial. Ilustraremos otras formas específicas durante la exposición. En lo que sigue queremos referirnos a lo que constituye la médula de las nuevas tecnologías: el punto cuántico.

Los puntos cuánticos representan quizá el más refinado logro en la miniaturización de los circuitos electrónicos. El método más sencillo de fabricarlos, con miras a su comercialización, es por grabado químico sobre un semiconductor, usualmente el GaAs. Su forma es a menudo la de un disco muy delgado, de unos pocos Å de espesor. El diámetro del disco, una especie de caja o corral para los electrones, suele estar entre 10 y 100 nanómetros. El número de electrones en el punto puede variarse a voluntad, entre uno y miles. Usualmente uno de estos discos o “puntos” tiene desde varias decenas de miles hasta millones de átomos.

Un punto cuántico con un solo electrón constituye un transistor de extrema sensibilidad. Obsérvese que la corriente que se detecta en un transistor usual, uno de los millones de transistores que suele haber en el microchip de un procesador moderno, corresponde al paso de varios miles de electrones a la vez. En el transistor de un electrón pasa un electrón cada vez, produciéndose una especie de “goteo” electrónico. Por otra parte, el número de transistores que puede acomodarse ahora en un chip nanotecnológico es de varios billones. El comportamiento de cada nanotransistor es rigurosamente cuántico: las leyes clásicas ya no rigen. Es mucho lo que tenemos que aprender todavía. Mientras la ingeniería cuántica avanza hasta el punto de permitirnos desarrollar “nanoswitches” o nanoconmutadores, “chips” de memoria y compuertas para la futura generación de computadores, necesariamente cuánticos, los físicos, los químicos y demás investigadores tendremos que utilizar los puntos cuánticos para aprender de ellos nuevas características que apenas empezamos a prever.

Escuetamente hablando, los puntos cuánticos son diminutas regiones conductoras en un semiconductor que contienen un número de electrones variable a voluntad; cada electrón ocupa estados cuánticos discretos bien definidos: son,

pues, verdaderos átomos artificiales. Pero a diferencia de los átomos naturales, podemos diseñar a voluntad esos estados. Podemos sintonizar a voluntad energías, en principio en el rango que se desee. Basta introducir apropiadamente los puntos cuánticos dentro de un nanocircuito. La tarea que espera a los nuevos ingenieros es por supuesto formidable.

Con un poco de imaginación, es claro que podemos ensamblar moléculas artificiales: basta manipular a conveniencia esos átomos artificiales. Con estos podemos modelar los distintos enlaces que conocemos de la química y física convencional: iónicos, covalentes, metálicos, etc. Los circuitos moleculares ya son objeto de estudio en diversos laboratorios.

Hemos pasado por alto un detalle muy importante: manipulando apropiadamente los átomos con luz, podemos amplificarla en el láser. Recuérdese lo que significa esta sigla: *light amplification by stimulated emission of radiation*. (Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación). Ya se han ensayado arreglos ordenados de puntos cuánticos para dar lugar a lo que se denomina *el nanoláser*. El reducido espacio de que disponemos no nos permite dar mayores detalles. Rápidamente nos referimos enseguida a algunas otras aplicaciones.

5. Algunas aplicaciones

Al igual que los átomos naturales, los átomos artificiales o puntos cuánticos pueden manipularse con luz. Pero a diferencia de aquellos pueden llegar a comercializarse. Una de las características que hace factible esto es la excitación de un par electrón-hueco mejor conocido como excitón. ¿Qué es, pues, un excitón? Ya hemos dicho que es una especie de átomo hidrogenoide. Cuando un electrón “abandona” en un semiconductor un estado permitido de baja energía para pasar a un estado excitado, deja tras él lo que se denomina un “agujero” o hueco, con carga positiva. Bajo ciertas condiciones los dos, el electrón y su hueco, se mantienen ligados; para crear el par electrón-hueco hay que invertir una cierta energía; o dicho en otra forma, cuando el electrón y el hueco se recombinan, dejan una energía disponible que se puede aprovechar. El canal óptico es el más apetecido generalmente.

Una de las características del excitón en el punto cuántico es que se deja manipular más fácilmente que en un semiconductor en bloque. Por ello facilita la coherencia, indispensable para las aplicaciones ópticas que se buscan. Puesto que en un arreglo de puntos se tiene una distribución significativa de tamaños, el problema a resolver es limitarse a uno de ellos. Esto se logra hoy en día en el laboratorio.

Con láseres de suficiente potencia sintonizados sobre la brecha de energía, es posible crear un segundo excitón: ese estado de dos excitones se llama precisamente biexcitón. Su estado más bajo de energía es de singlete, como en el caso de dos electrones. Todavía con mayor intensidad, un láser puede generar estados multiexcitónicos. Lamentablemente no podemos detenernos en su uso, pero no sobra comentar que uno de ellos es formar lo que se denominan "estados enredados", de gran interés para la computación cuántica.

Hay otro tipo de puntos cuánticos que corresponden realmente a moléculas individuales. La sugerencia de utilizar moléculas complejas para realizar las funciones básicas de la electrónica digital data de mediados de los setenta. Ello se ha logrado efectivamente para componentes individuales, pero la fabricación de circuitos completos continúa siendo un gran reto por la dificultad en conectar una molécula con otra. Una reciente propuesta, más revolucionaria todavía, es lograr una mono-molécula que haga todas las funciones integralmente. Por brevedad preferimos remitir al lector a un reciente artículo de revisión sobre el tema [8].

No podríamos concluir este artículo sin referirnos a otro tipo de sistemas de baja dimensionalidad que han sido objeto de intensa actividad investigativa en los últimos años. Nos referimos a los nanotubos de carbono. La literatura sobre el tema es muy amplia y variada. En nuestro departamento se están investigando estas estructuras tanto teórica como experimentalmente.

Para terminar quiero suministrar al lector algunas páginas electrónicas en las que puede encontrar mayor información sobre este y similares temas:

<http://www.nature.com/cgi-taf/gateway.taf?g=3&file=/materials/nanozone/archive/jan03.html>

Si al final cambia el mes y el año, encontrará páginas similares sobre el asunto.

Referencias

- [1] A. G. de Mesa *Centenario de la teoría cuántica, 14 de diciembre de 1900: ¿descubrimiento del azar* Revista Colombiana de Física **33** 1 (2001)
- [2] J. Giraldo *De la gran explosión a la optoelectrónica del siglo XXI* Deslinde (Revista de Cedetrabajo) **26** 124 (2000)
- [3] J. Giraldo *Centenario de la teoría cuántica* Lecturas Dominicales **El Tiempo**, Diciembre 28 de 2000.
- [4] J. Giraldo y K. Fonseca *Del ábaco a la computación cuántica* Suplemento 2, *Computación*, **El Tiempo**, 18 de diciembre de 2000. Otra versión

adaptada de este artículo se encuentra en *Boletín de la Seccional del Centro de la Sociedad Colombiana de Física*. (Vol. 1, No. 1, Mayo de 2001).

- [5] R. P. Feynman *Física*, Vol. 3, Editorial Reverté, 1980
- [6] *NANOTECH* The science of the small goes down to business, *Scientific American*, Special Issue, September 2001. (La versión en español de ese fascículo corresponde a *Investigación y Ciencia*, Diciembre de 2000).
- [7] En las revistas *Science*, *Nature* y *Physics Today* salen a menudo artículos divulgativos (también especializados) sobre el tema. También en las páginas web de la *National Science Foundation* y similares.
- [8] C. Joachim *et al.* *Nature* **408** 541 (2000)
- [9] IBM Corporation *STM Image Gallery*
www.almaden.ibm.com/vis/stm
- [10] M. Ratner and D. Ratner, *Nanotechnology: a gentle introduction to the next big idea*, Prentice Hall (2002)