

# Sobre la Implementación Física de la Información y la Computación Cuántica

V. Martín  
FIM-UPM

Mayo 2003

# Esquema: Demasiadas Transparencias

## Para 1 hora (...aunque haya muchas fotos)

- El qubit físico y el acceso a sus características.
- Ordenadores Cuánticos: Los típicos
  - NMR, Trampas de Iones, Fotones+Cavidades.
- Ordenadores Cuánticos: Propuestas avanzadas viables.
  - Basadas en microelectrónica y nanotecnologías
- Tecnologías asociadas a QC o nanotecnología con un posible impacto recíproco.
- Algunas preguntas básicas por resolver.

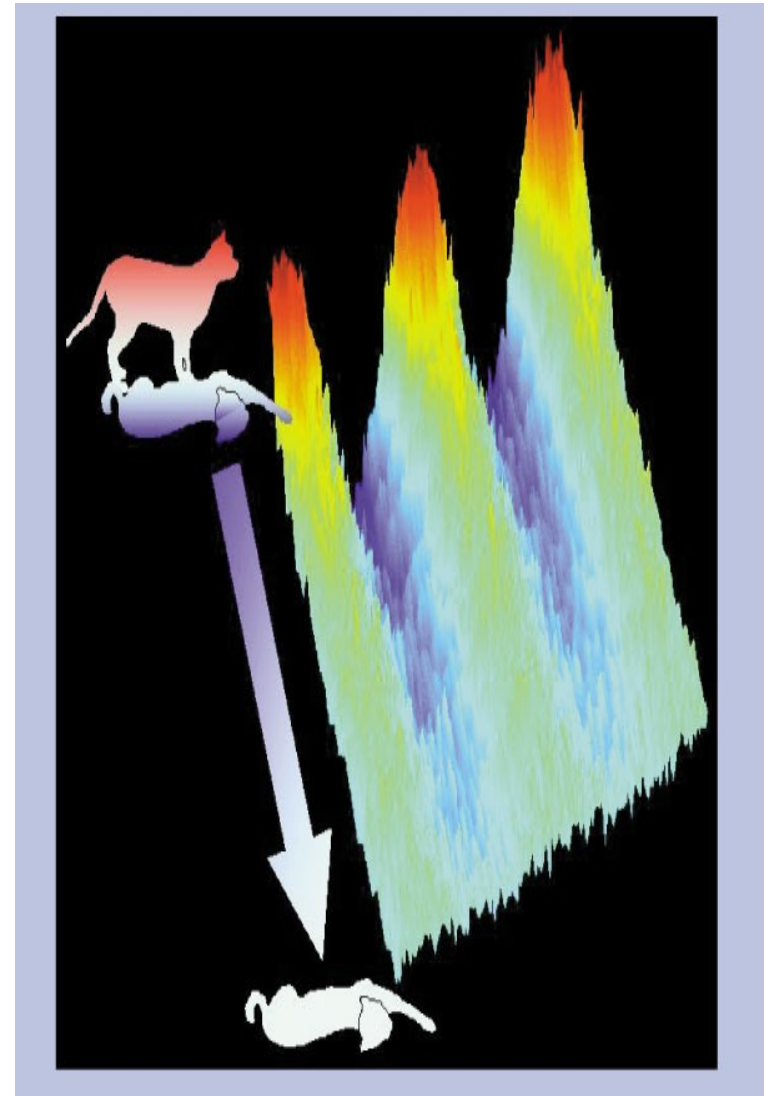
# Características físicas del Qubit

- Qubit:  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 
  - Elemento en un espacio de Hilbert bidimensional.
  - $|0\rangle, |1\rangle$  Base computacional
- Hay que encontrar una representación física de la base computacional que nos permita:
  - Inicialización en algún estado conocido.
  - Aplicación de puertas lógicas.
  - Lectura



# Problemas

- Decoherencia: El mundo que vemos es clásico. Una moneda tiene cara y cruz, pero no muestra una combinación lineal de estados cara con estados cruz. El tiempo de decoherencia disminuye exponencialmente con el tamaño de la superposición



$$\langle \text{cat} | \hat{H} | \text{cat} \rangle$$



# Necesitamos:

- Que el qubit este desacoplado del entorno: Su evolución temporal sólo debe depender de las puertas que estemos aplicando. Durante este tiempo se debe conservar las capacidades de interferencia y entrelazamiento.
- Inicialización/Puertas/Lectura → Para estas operaciones necesitamos un acoplo fuerte pero de manera controlada.

# Representaciones.

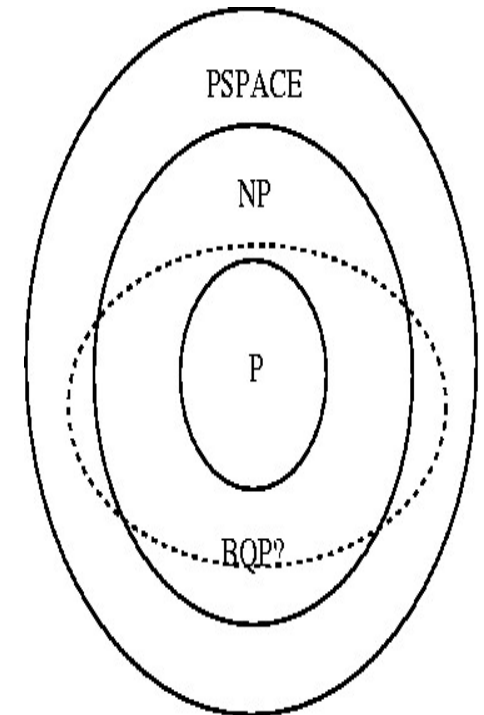
- Ideal:  $|0\rangle, |1\rangle$  representados como estados intrínsecos de un sistema donde no puede haber más ➡ Requisitos reducidos para su implementación.
- Codificado en más estados: Un sistema con cuatro estados puede codificar 2 qubits... en los infinitos estados de energía de un sólo átomo podríamos codificar todos los qubits que quisieramos...si tuviésemos una resolución infinita en energía y una capacidad infinita de aislamiento.
- Espacios libres de decoherencia: Codificaciones con estados que no experimentan -salvo una fase colectiva- evolución con el ruido.

# Ejemplos y propuestas

Qubit físico	T. Decoherencia	T. operación	Tipo
Spin nuclear	$10^{-2} - 10^8$	$10^{-3} - 10^{-6}$	Espín
Spin electrónico	$10^{-3}$	$10^{-7}$	Espín
Trampa de Iones	$10^{-1}$	$10^{-14}$	Espín
Punto Cuántico	$10^{-6}$	$10^{-9}$	Carga
Cavidad óptica	$10^{-5}$	$10^{-14}$	Fotón
Klystron	1	$10^{-4}$	Fotón
Union Josephson	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^9$	Carga/Flujo

# Capacidades

- Superposición, Interferencia
  - ¿Velocidad?
- Entrelazamiento:
  - $(a|0\rangle + b|1\rangle) \otimes (c|0\rangle + d|1\rangle) \neq \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$
  - ¿Almacenamiento?



# Interferencia

- No todos los algoritmos cuánticos requieren entrelazamiento. Ej: Grover. La velocidad es la misma. La limitación es el tamaño de la base de datos.

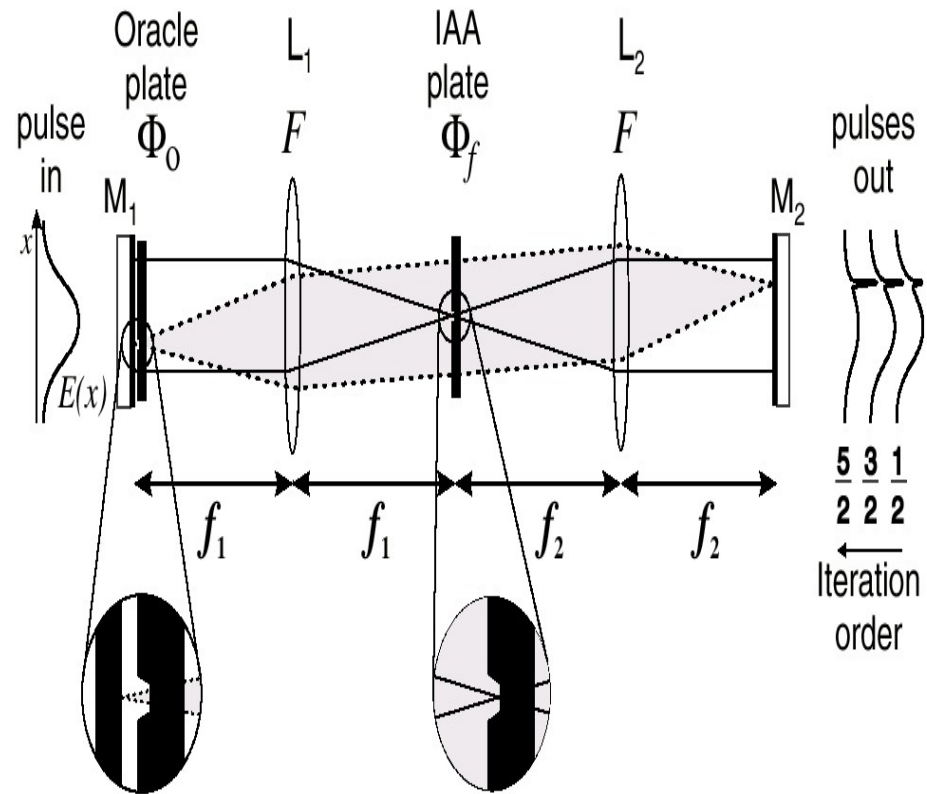


FIG. 1. Cavity implementing Grover's algorithm using optical interference. We launch a short laser pulse with a Gaussian

# Entrelazamiento

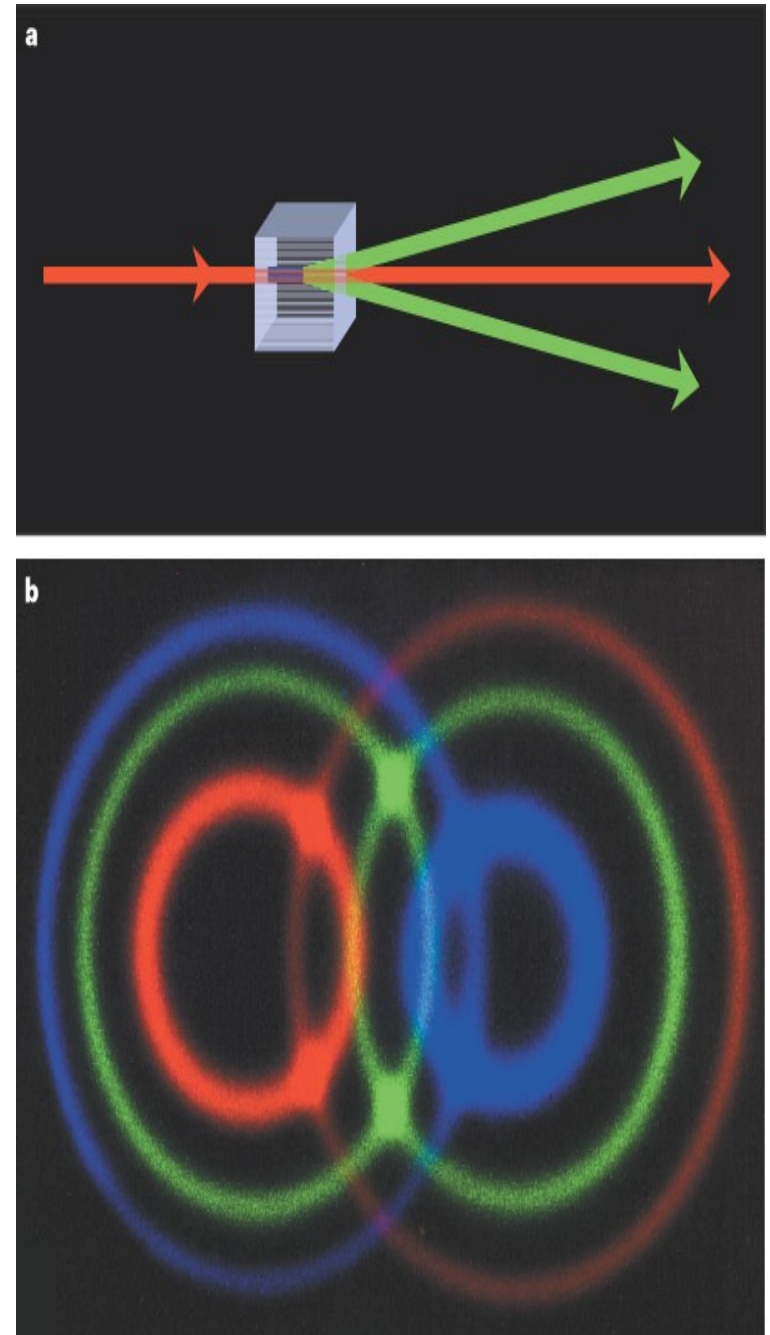
- Estados conjuntos de dos o más qubits no factorizables como producto de qubits individuales → NO localidad. Correlaciones no clásicas
  - Sin entrelazamiento los recursos necesarios crecen exponencialmente
    - ¿Es el ingrediente esencial de la computación cuántica?

# Generación de estados entrelazados

- Habitual: Conversión paramétrica decreciente (de baja). Muy baja eficiencia: Un par de fotones entrelazados por cada  $10^{10}$ 
  - En la parte dcha/izq de los conos esta en polarización vertical/horizontal. En las intersecciones está en un estado entrelazado:

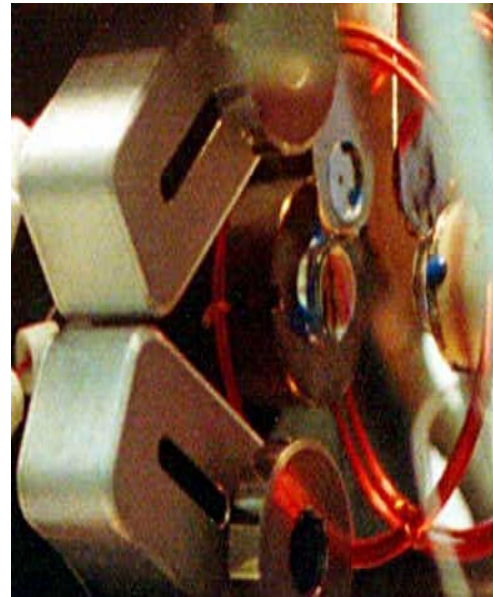
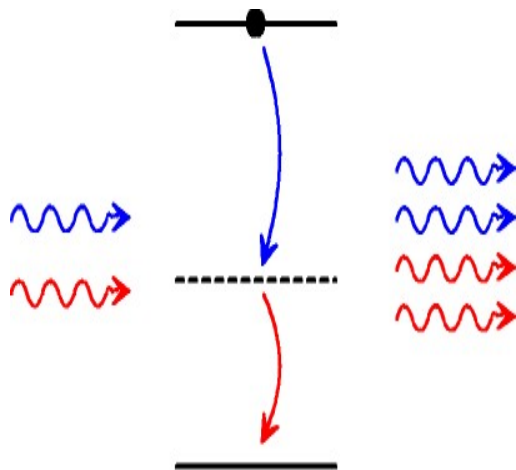
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\rightarrow\uparrow\rangle - |\uparrow\rightarrow\rangle)$$

Zeilinger, U. Vienna



# Generación de entrelazamiento.

- Láseres de dos fotones. Pulsos compuestos de dos haces de fotones en estados entrelazados. Uso evidente en criptografía cuántica.



Pfister. 'Polarization Instabilities in a Two Photon Laser' Phys. Rev. Lett. 86,4512(2001)

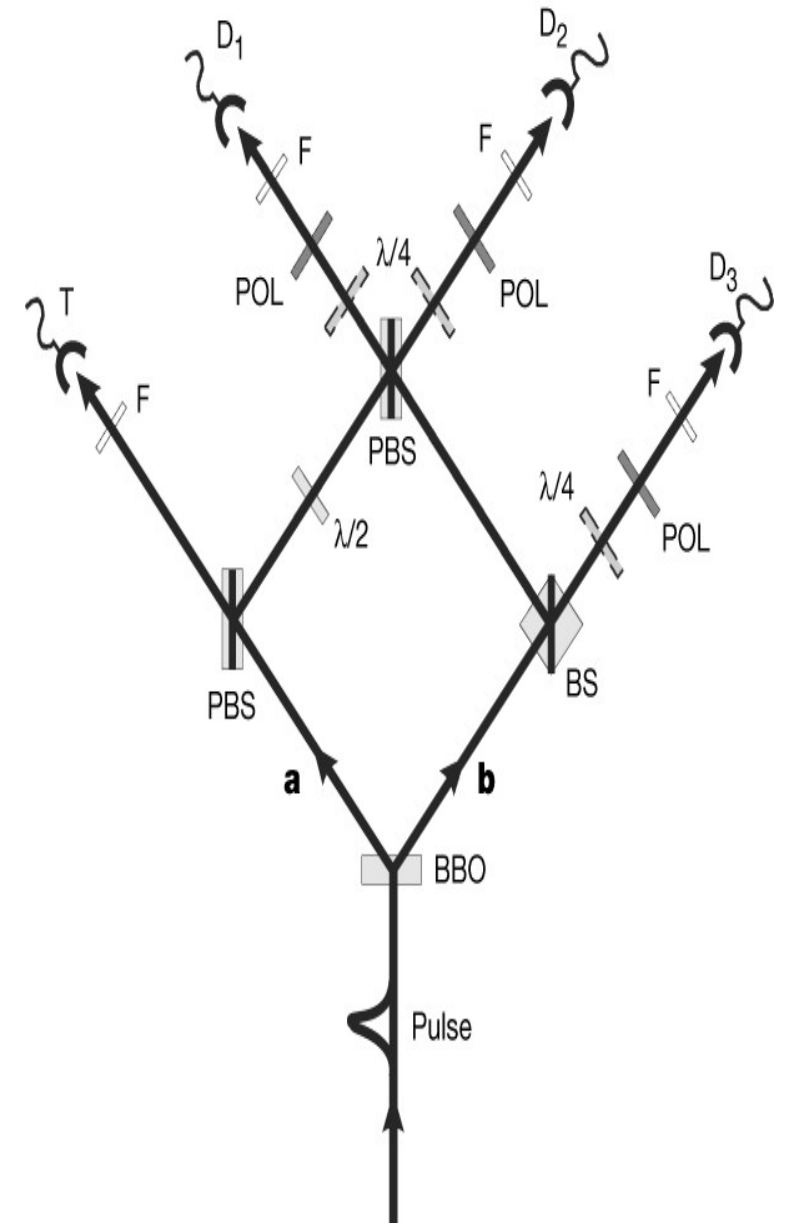


# Triplettes y más

- Tres qubits entrelazados:  
Greenberger-Horne-Zeilinger  
(GHZ)

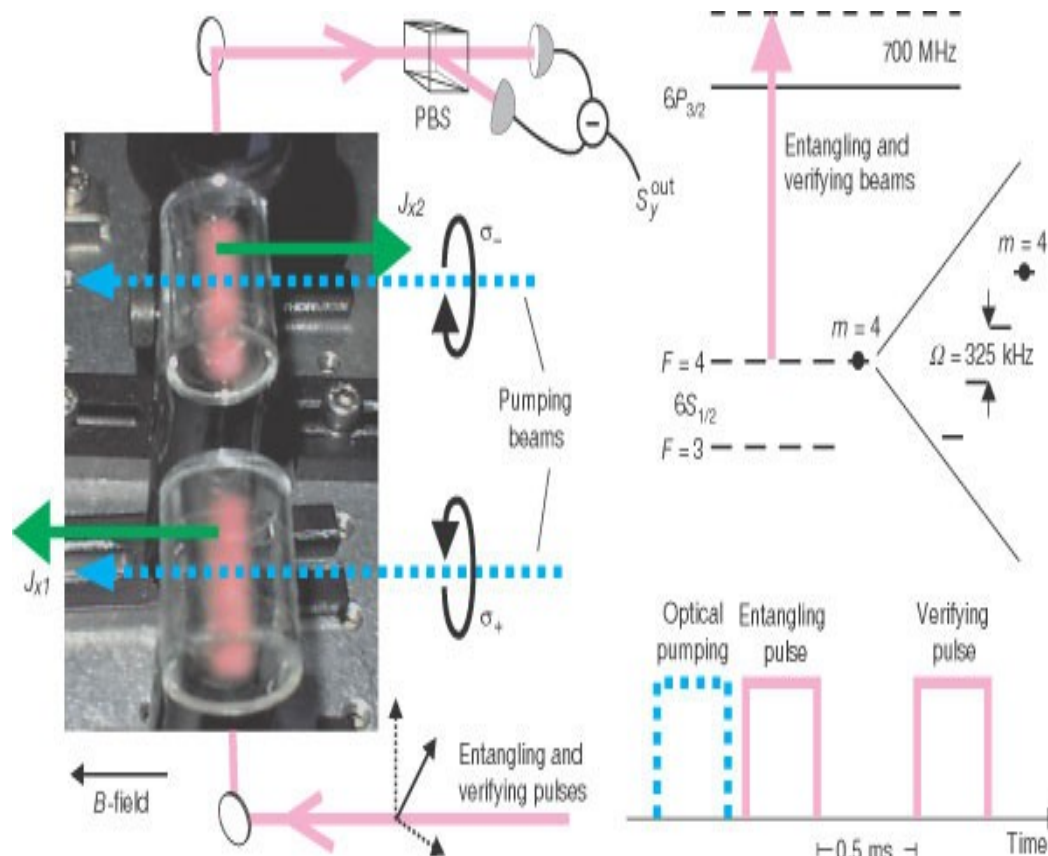
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle)$$

- Útiles también para resolver temas fundamentales:  
Desigualdades de Bell. No localidad



# Generación de entrelazamiento

- Entrelazamiento macroscópico:  $10^{12}$  átomos de cesio

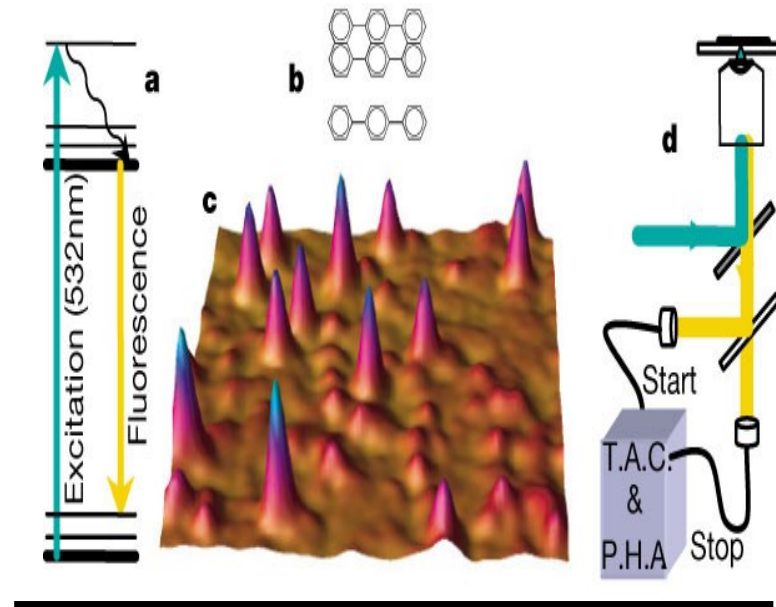


¿Qué significado tiene esto desde el punto de vista de información cuántica? Criptografía y comunicación, Ej. Codificación densa.

Duan, 'Long-Distance Quantum Communication with Atomic Ensembles and Linear Optics'. Nature, 414, 413 (2001)

Julsgaard, 'Experimental Long-Lived Entanglement of Two Macroscopic Objects'. Nature 413,400(2001)

- Moléculas



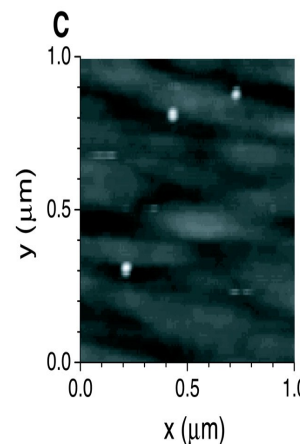
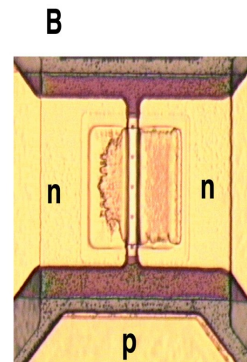
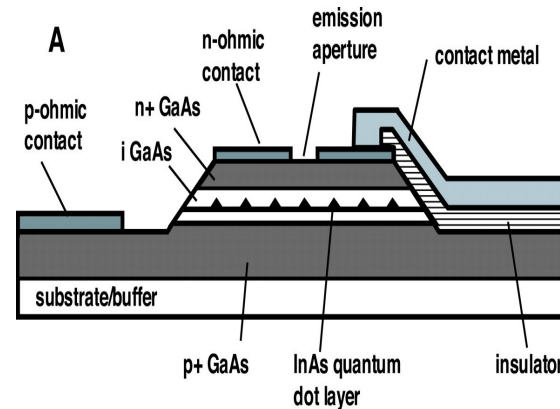
Lounis. 'Single Photons on Demand From a Single Molecule at Room Temperature' Nature 407,491(2000)

\*  $2.5 \times 10^6$  fotones/seg.

\*  $p(2) < 8 \times 10^{-4}$

# Generación de fotones individuales.

- Puntos cuánticos.



\* prototipo a 5K

\*  $\sim 10^9$  Fotones/seg.

\* Posible en banda fibra óptica

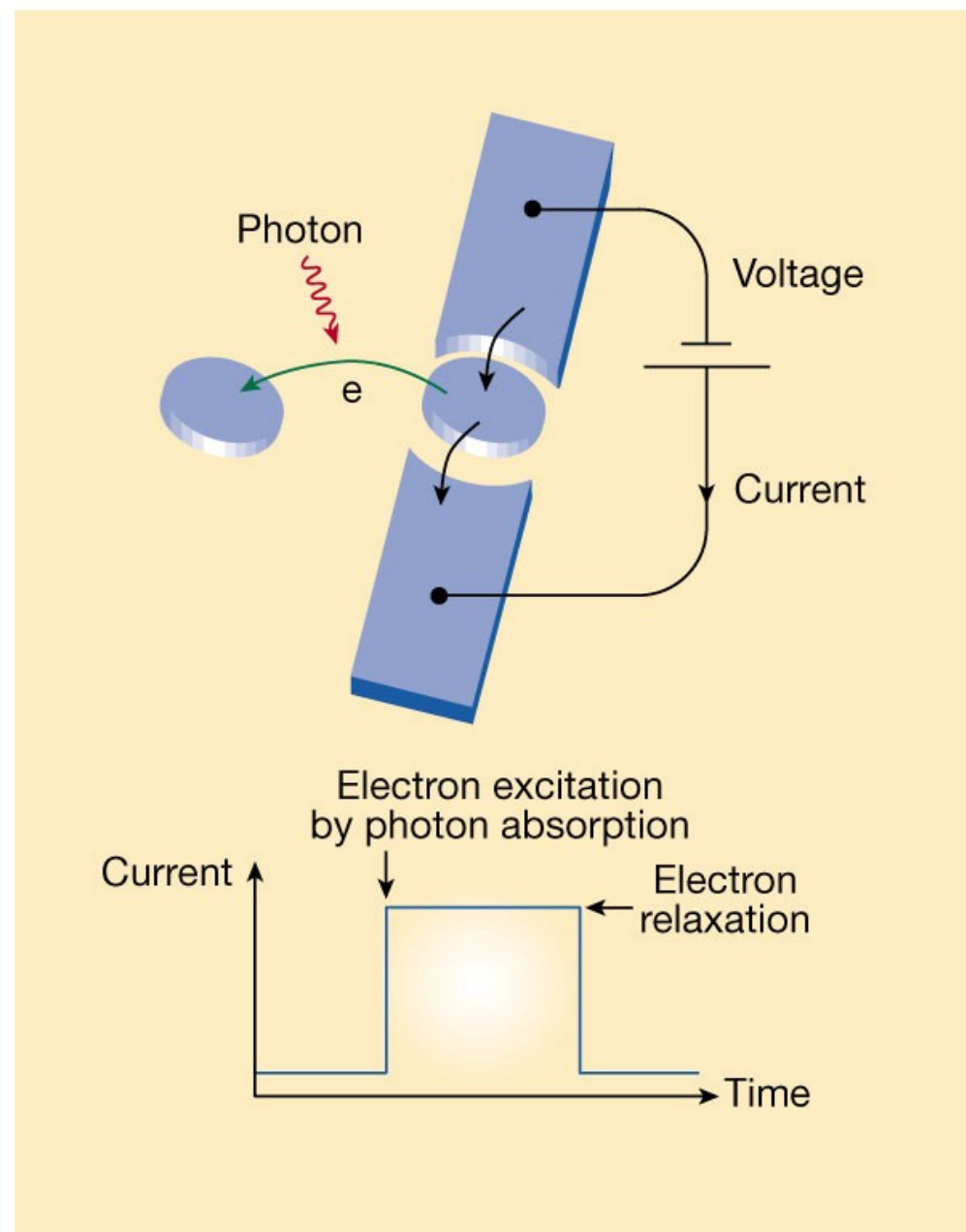
\* Producción en masa

Yuan. 'Electrically Driven Single-Photon Source'. Science 295,102(2002)

Hours, 'Single Photon Emission from Individual GaAs Quantum Dots', App. Phys. Lett. 82, 2206 (2003)

# Detección de Fotones Individuales

- Dependiendo del rango de frecuencias, es una técnica razonablemente madura.
  - Conteo de fotones.
- Propuesta basada en puntos cuánticos para el infrarrojo lejano:
  - Límite intrínseco 10 GHz
  - Demo a 10 MHz
  - Conteo oscuro  $< 0.001/s$
  - ... Bajas temperaturas 0.4K



# Propuestas de Ordenadores Cuánticos

- Realizados a un nivel razonable: Demostraciones de principio con unos pocos qubits.
  - Resonancia Magnética Nuclear (NMR): Algoritmos completos.
    - Cory, 'Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy: An Experimentally Accessible Paradigm for Quantum Computing', PhysComp96, New England Complex Systems Institute 91,87(1996)
    - Gershenfeld. 'Bulk Spin-Resonance Quantum Computation'. Science 275,350(1997)
  - Trampas de iones: Puertas básicas.
    - Cirac. 'Quantum Computation with Cold Trapped Ions', Phys. Rev. Lett. 74,4091(1995)
  - Esquemas de óptica lineal: Puertas básicas. Algoritmo D-J.
    - Knill, 'A Scheme for Efficient Quantum Computing with Linear Optics', Nature 409,46(2001)
  - Fotones+QED: Puertas básicas.
    - Donokos. 'Simple Cavity-QED Two-bit Universal Quantum Logic Gate: The Principle and Expected Performances' Phys. Rev. A 52,3554 (1995)

# Propuestas de Ordenadores cuánticos

- Escalables. Futuro:
  - Arrays de microtrampas
  - Moléculas adsorbidas.
  - Basadas en microelectrónica:
    - Uniones Josephson: Qubits de carga y flujo
    - Puntos cuánticos
    - Spintronics
    - Implantación de átomos donantes en silicio.
      - ... y más.
  - Arquitecturas completas de propósito general, lenguajes de programación...

# NMR: Computación sobre colectivos

- Macroscópica, temperatura ambiente, sin grandes instalaciones, 'barata'... pero de dudosa

escalabilidad

Cory, 'NMR Based Quantum Information Processing: Achievements and Prospects'. arXiv:quant-ph/0004104 (2000)

- Con ella se han implementado: Algoritmo de Grover, núcleos del algoritmo de Shor y de corrección de errores, etc.
  - Idea: De un colectivo macroscópico de moléculas se puede extraer una parte cuya evolución es matemáticamente idéntica a la de un grupo de qubits.
  - Dudas: ¿Tiene acceso al entrelazamiento? ¿Qué tiene de distinto sobre la computación usando, por ejemplo, óptica clásica?... ¿Cómo es de 'cuántica'?

# Espectroscopía NMR básica

- La base de la resonancia magnética nuclear es la absorción y emisión de radiación electromagnética de frecuencia dada por niveles de energía determinados por el espín.
  - Cuando una partícula con espín distinto de cero se encuentra en un campo magnético  $B$  puede absorber un fotón de frecuencia:

$$\nu = \gamma B$$

Donde  $\gamma$  es el factor giromagnético de dicha partícula.

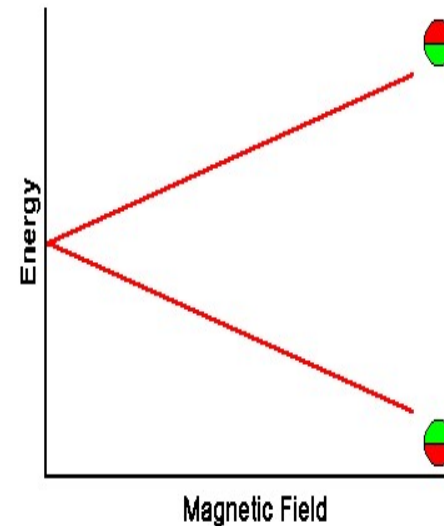
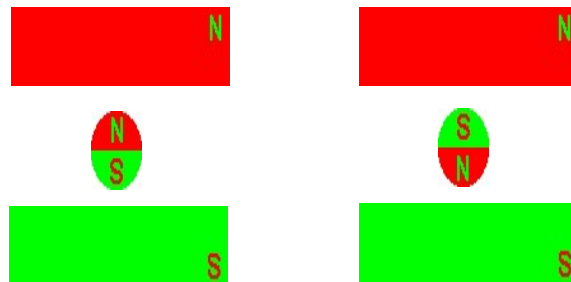


# NMR básico

Ver Hornak:

[www.cis.rit.edu/htbooks/nmr/bnmr.htm](http://www.cis.rit.edu/htbooks/nmr/bnmr.htm)

- Una partícula de espín  $1/2$  tiene dos estados posibles  $+1/2$  y  $-1/2$ . Según el estado en que se encuentre, si ponemos un campo magnético externo, el espín se alineará con dicho campo, comportándose como un pequeño imán cuyos polos podrán estar con la misma u opuesta orientación que el campo externo.

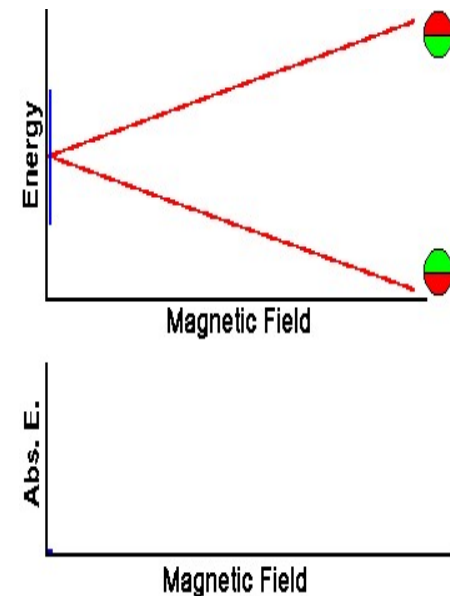


# NMR básico

- Estos dos estados constituyen dos niveles de energía entre los que se pueden producir absorciones y emisiones de fotones de energía:

$$E = h\nu = h\gamma B$$

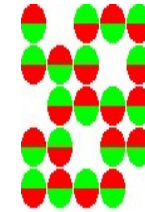
Experimento de  
onda continua (CW,  
Continuous Wave)



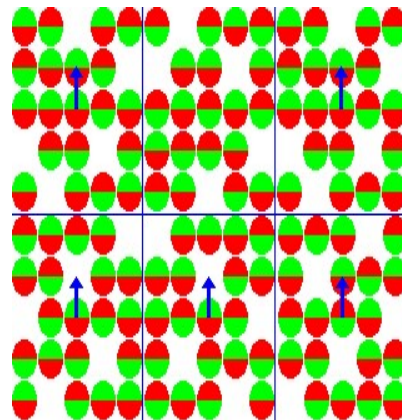
# NMR básico

- En una muestra sobre la que se hace NMR habrá una cierta cantidad de átomos con espín  $+1/2$  ( $N_+$ ) y otra con espín  $-1/2$  ( $N_-$ ). La relación entre las dos poblaciones nos la da la estadística de Boltzmann.

$$\frac{N_+}{N_-} = e^{-E/kT}$$



- El estado de cada espín evoluciona en el tiempo pero en promedio hay una magnetización neta en la dirección del campo aplicado ( $Z$ ).



# NMR básico

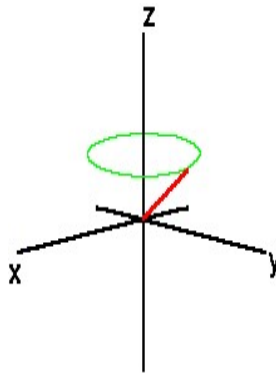
- Es posible variar  $M_z$  usando pulsos de frecuencia  $\nu$
- La variación temporal viene descrita por

$$M_z = M_0 \left( 1 - e^{-t/T_1} \right)$$

$T_1$  Es conocido como el tiempo de relajación espín-red

# NMR básico

- Si la magnetización neta está en el plano XY,  $M_{xy0}$  empezará a rotar alrededor del eje Z a una frecuencia  $\nu$ . Esta se denomina la frecuencia de Larmor.

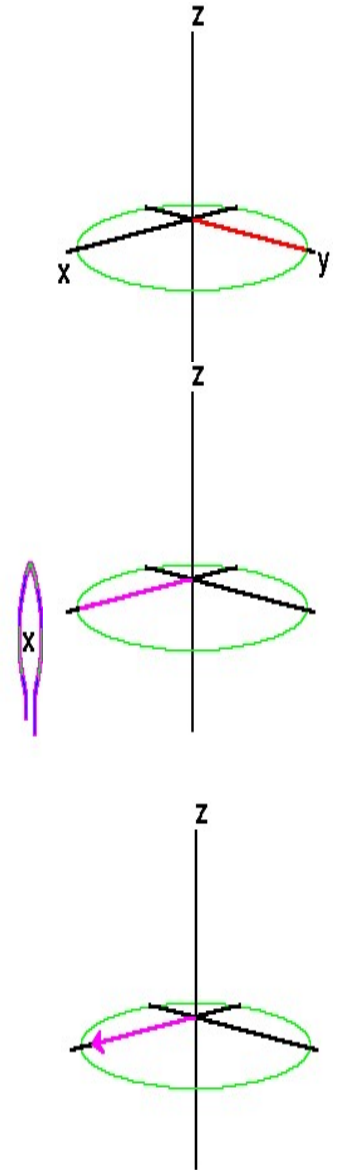


- La evolución temporal será  $M_{xy} = M_{xy0} e^{-t/T_2}$

$T_2$  Es la constante de relajación espín-espín

# NMR básico

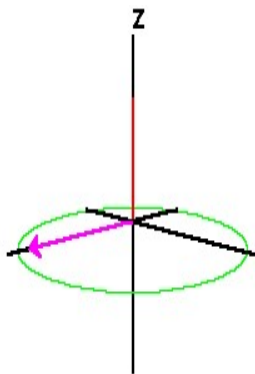
- Es habitual usar un sistema de coordenadas que rota entorno a Z a la frecuencia de Larmor.
- Una bobina en el eje X con una corriente oscilante hará que la magnetización oscile
- Pero en un sistema de referencia rotante a la frecuencia de Larmor, es como si estuviese fija.



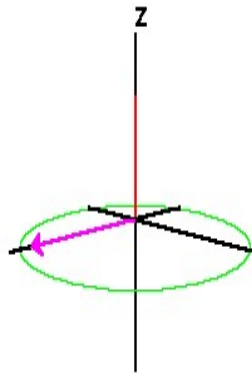
# NMR básico

- En NMR al campo creado por la bobina en el eje X oscilando a la frecuencia de Larmor se le llama  $B_1$
- Si tenemos la bobina conectada un tiempo  $\tau$  esto inducirá una rotación en la magnetización neta de ángulo

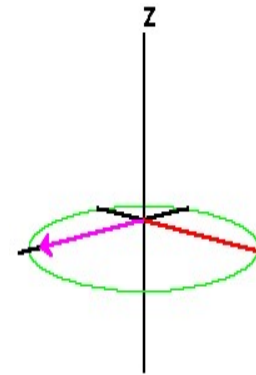
$$\theta = 2\pi \gamma \tau B_1$$



Pulso de 90 grados: rota desde equilibrio (0z) hasta 0y'




Pulso de 180: rota desde equilibrio hasta -oz



Pulso de 180: desde oy' hasta -oy'

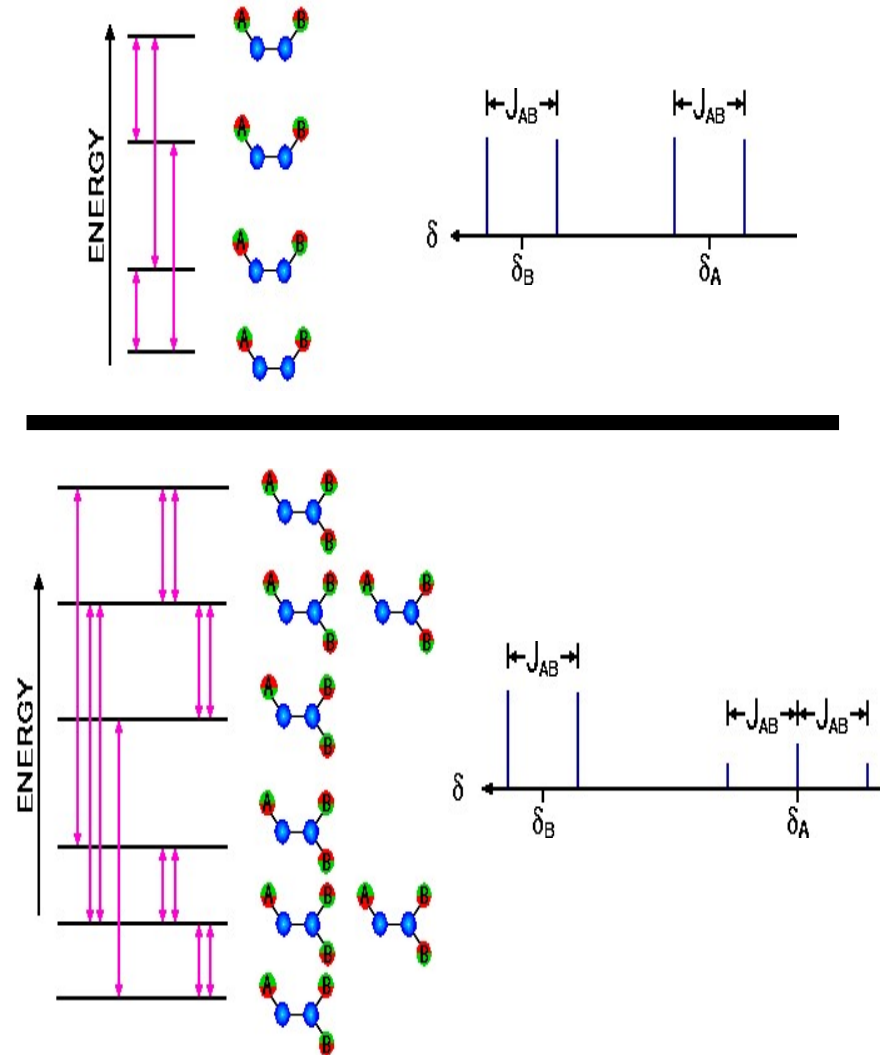
# NMR básico

- Cuando ponemos un átomo en un campo magnético la nube electrónica que le rodea se polarizará, haciendo que el campo efectivo que siente el núcleo sea distinto del campo externo aplicado.
- Si consideramos una molécula compleja, cada átomo tendrá una nube electrónica que variará de acuerdo con su estructura química, con lo que el campo efectivo que siente cada núcleo depende de su vecindad. La frecuencia de Larmor de cada núcleo será  distinta (Shift químico)



# NMR básico

- Núcleos con distinto entorno químico se denominan no-equivalentes. Si dos de estos núcleos están cerca en una molécula se influncian el uno al otro a través del acoplo espín-espín. Según sea el espín de cada núcleo las diversas configuraciones tienen distintas energías

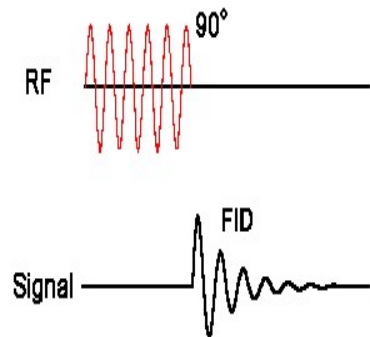
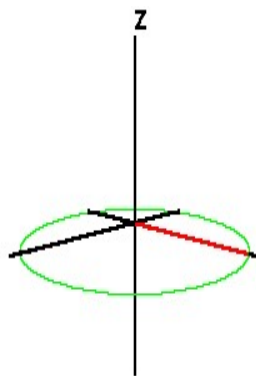
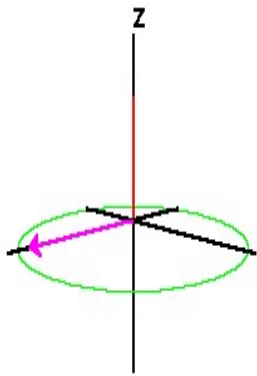


# NMR básico

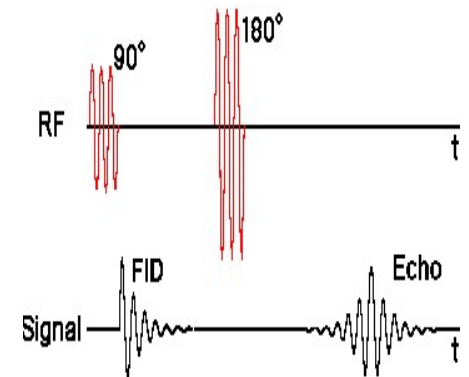
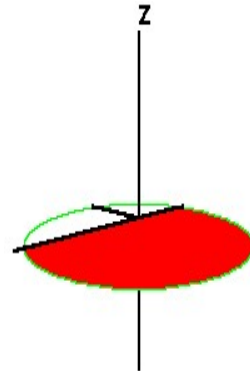
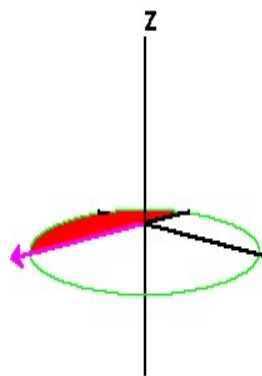
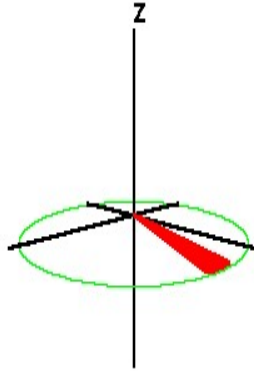
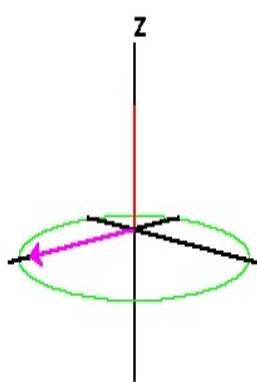
- El esquema básico para controlar un aparato NMR es entonces la producción de pulsos en la bobina. Secuencias de estos pulsos han permitido hacer el análisis estructural de moléculas complejas... y a nosotros nos permitirán hacer computación cuántica sobre colectivos.

# NMR básico

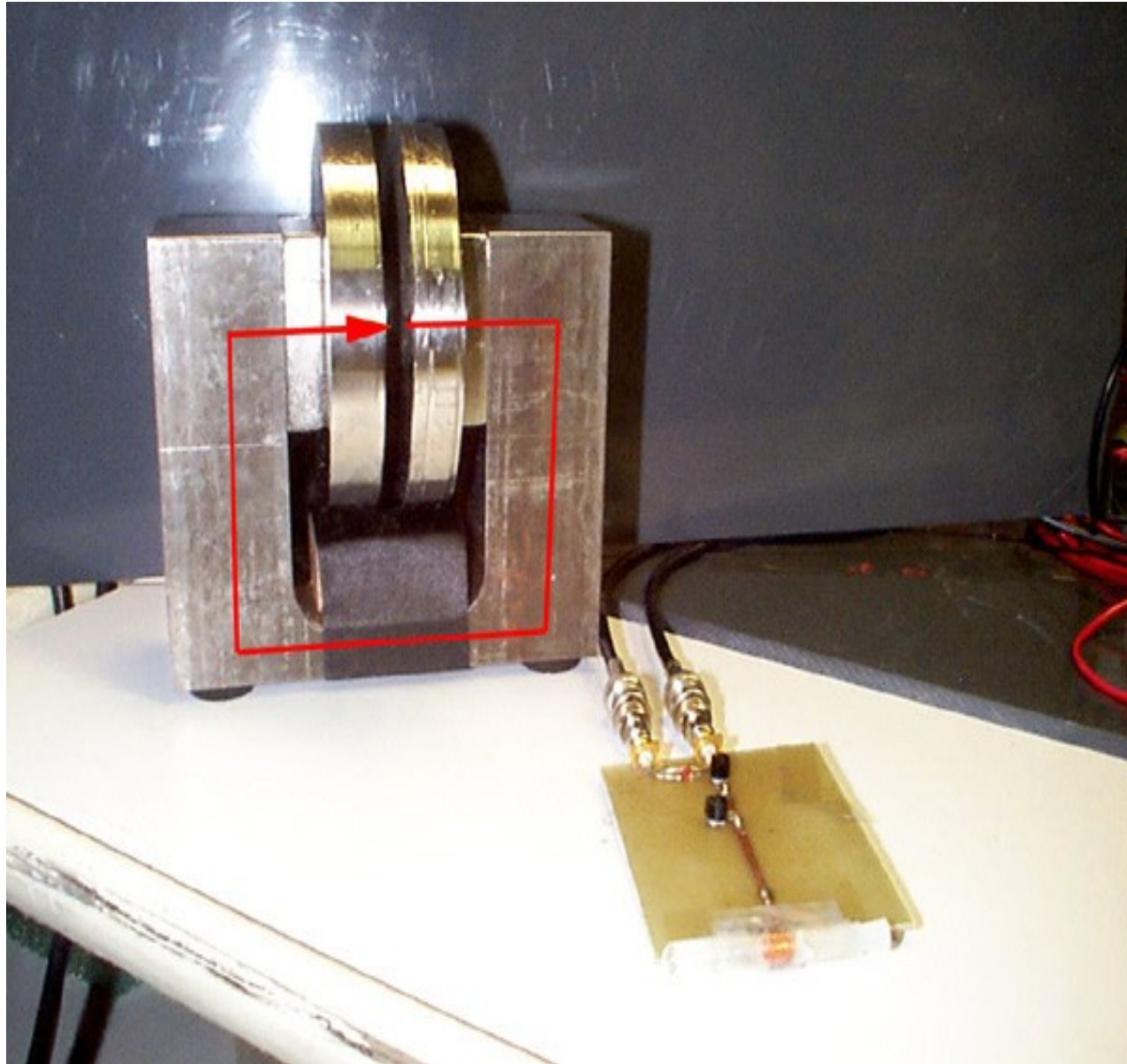
- Secuencia FID (Free Induction Decay)



- Secuencia Spin-eco



# El aspecto de un QC NMR



# NMR QC sobre colectivos

- Realmente NO tenemos qubits individuales. El sistema viene descrito por una matriz densidad:

$$\rho = \rho_1 \otimes \rho_2 \otimes \rho_3 \otimes \dots$$

- Donde  $\rho_i$  es la matriz densidad  $2^N \times 2^N$  de la  $i$ -ésima molécula que contiene N qubits. Para un qubit y en equilibrio térmico tendremos

$$\rho_i = \begin{bmatrix} \rho_{\downarrow} & 0 \\ 0 & \rho_{\uparrow} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & -\alpha \end{bmatrix}$$

# NMR

- Para una molécula con N espines su matriz densidad será el producto tensorial de los espines individuales:

$$\rho = \rho_1 \otimes \rho_2 \cdots \otimes \rho_N$$

- Para una molécula con dos espines:

$$\rho = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \alpha_1 + \alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 - \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_1 + \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_1 - \alpha_2 \end{bmatrix}$$

# NMR

- En general el estado de un sistema de moléculas de N espines estará descrito por una matriz densidad

$$\rho = \frac{I}{2^N} + \rho_\alpha$$

- Y su evolución macrocópica refleja la microscópica:

$$U \rho U^\dagger = \frac{I}{2^N} + U \rho_\alpha U^\dagger$$

# NMR

- En general se tiene (muy aproximadamente) que todos los  $\alpha_i$  son iguales, con lo que la matriz densidad  $\rho_\alpha$  de dos espines es:

$$\rho_\alpha = \frac{2\alpha}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Que implica que el estado del primer espín es un estado puro condicionado a la medida del segundo



# NMR

- Si se aplican transformaciones unitarias al primer espín y se “congela” la evolución del segundo, tenemos

$$\begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\downarrow\rangle\langle\downarrow| & 0 \\ 0 & -|\uparrow\rangle\langle\uparrow| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix}^\dagger =$$

$$\begin{bmatrix} U|\downarrow\rangle\langle\downarrow|U^\dagger & 0 \\ 0 & -U|\uparrow\rangle\langle\uparrow|U^\dagger \end{bmatrix}$$

# NMR

- Lo que significa que la salida es bien

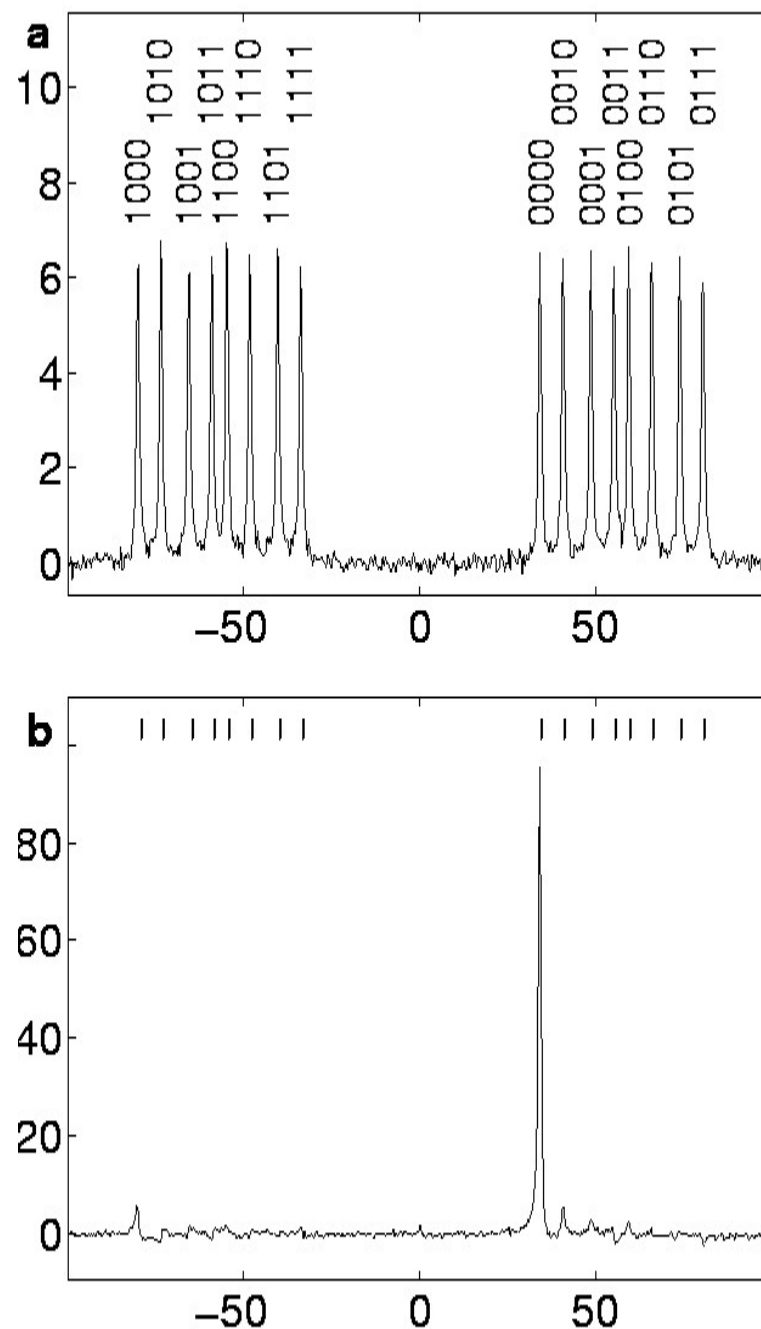
$$- U |\uparrow\rangle\langle\uparrow| U^\dagger$$

$$- U |\downarrow\rangle\langle\downarrow| U^\dagger$$

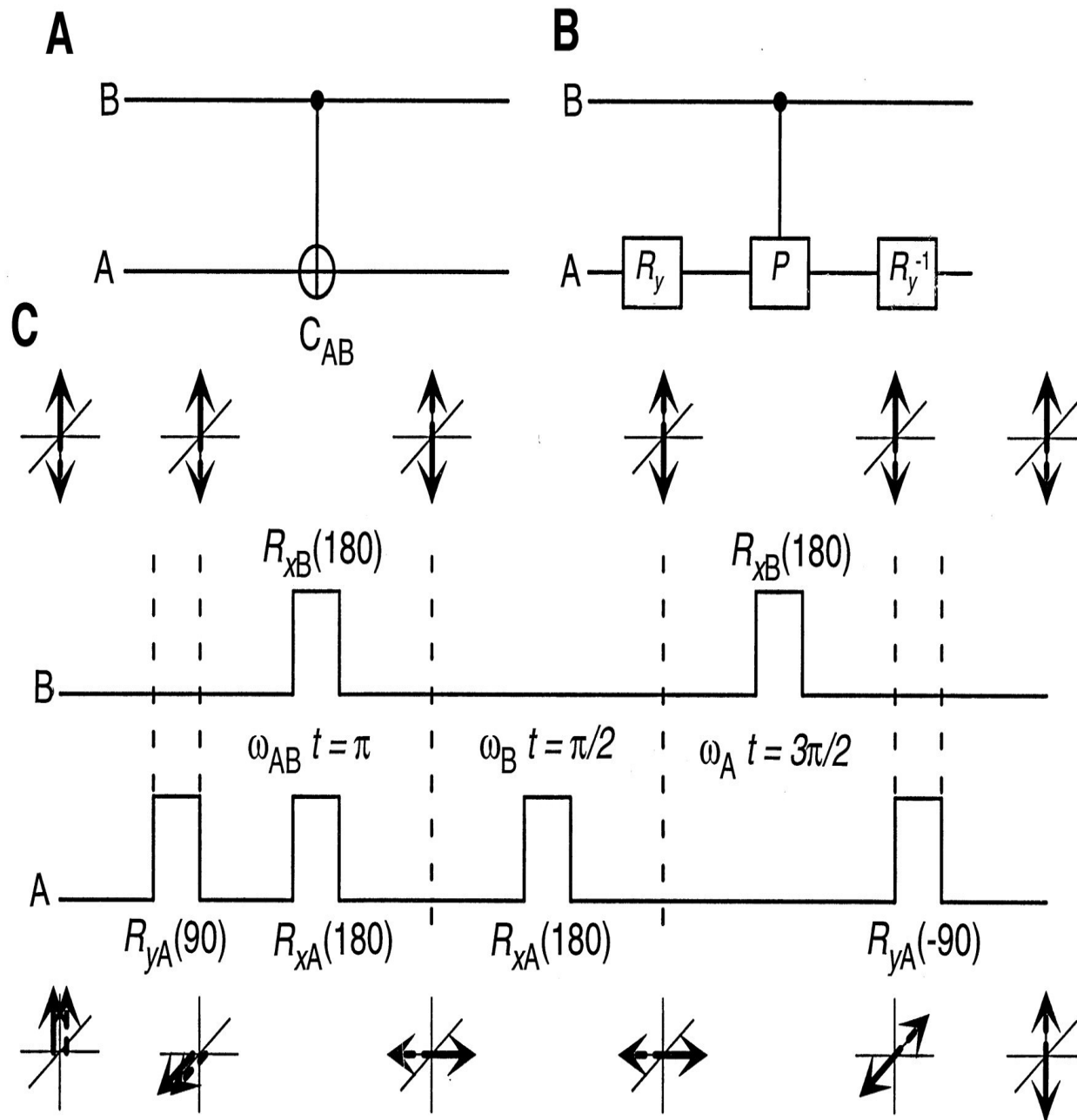
- Que son distinguidas por el estado del segundo qubit.
- NMR obtiene N qubits de 2N espines termalizados.

# Puertas cuánticas en NMR

- Se obtienen como una secuencia de pulsos a las frecuencias adecuadas para direccionar los espines (qubits) seleccionados.



# Puertas Cuánticas en NMR: CNOT



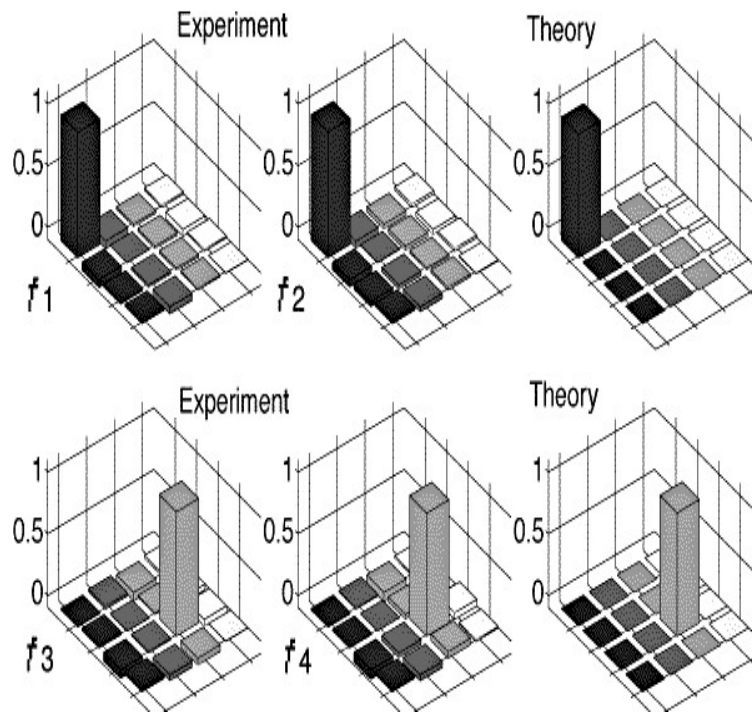
Gershenfeld, 'Bulk  
Spin-Resonance  
Quantum Computation',  
Science 275,350(1997)

# Lectura de resultados en NMR

- Se necesita una secuencia de pulsos para efectuar la lectura.
  - La técnica usada (Quantum state tomography) requiere  $3^N$  secuencias de pulsos. En cada secuencia hay que analizar hasta  $2^N$  picos.

# Resultados NMR

- La representación típica de resultados QST:



## Algoritmo Deutsch-Jozsa

Experimental realization of a quantum algorithm  
I. Chuang, Nature 393, 143 (1998)

# Lo que se ha hecho.

- Esencialmente, pruebas de concepto:
  - Algoritmos iniciales de prueba: D-J
  - Algoritmo de Grover (3 qubits)
    - Jones, 'Implementation of a Quantum Search Algorithm on A Quantum Computer', Nature 393,344(1998)
  - Núcleo del algoritmo de Shor (3 y 7 qubits)
    - Weinstein, 'Implementation of the Quantum Fourier Transform', quant-ph/9906059
    - Vandersypen, 'Experimental Realization of Shor's Quantum Factoring Algorithm Using Nuclear Magnetic Resonance', Nature 414,883(2001)
  - Corrección de errores (3 y 5 qubits)
    - Knill, 'Implementation of the Five Qubit Error Correction Benchmark', quant-ph/0101034
  - Subsistemas libres de ruido (3 qubits)
    - Viola, 'Experimental Realization of Noiseless Subsystems for Quantum Information Processing', Science 293,2059(2001)

# NMR Problemas

- Escalabilidad: NMR en estado líquido, máximo número de qubits esperables del orden de 10.
  - Se puede mejorar aumentando la polarización inicial, y esto se puede hacer... ¡usando un algoritmo cuántico! Boykin, 'Algorithmic Cooling and Scalable NMR Quantum Computers'. arXiv:quant-ph/0106093
- La velocidad máxima a la que se pueden aplicar los pulsos está limitada intrínsecamente.
- ¿Cómo es de cuántica NMR-QC?
  - Dudas sobre el acceso al entrelazamiento desde colectivos. ¿Son equivalentes a los resultados de "solo interferencia" usando ondas clásicas? Braunstein, 'Separability of Very Noisy Mixed States and Implications for NMR Quantum Computing' Phys. Rev. Lett. 83,1054(1999)



# NMR Futuro

- Propuestas de escalabilidad:
  - Aumento de la polarización inicial de la muestra.
  - NMR en estado sólido
  - Uso de moléculas especialmente diseñadas. Cadenas largas.
  - Diseños especiales:

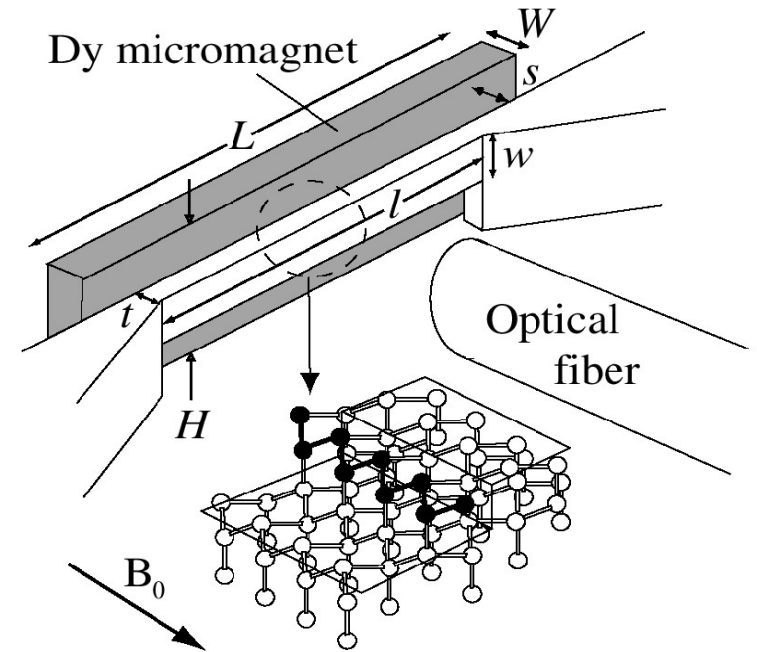




FIG. 1. The integrated micromagnet and bridge structure. The bridge has length  $l = 300 \mu\text{m}$ , width  $w = 4 \mu\text{m}$ , and thickness  $t = 0.25 \mu\text{m}$ . The micromagnet, a distance  $s = 2.1 \mu\text{m}$  from

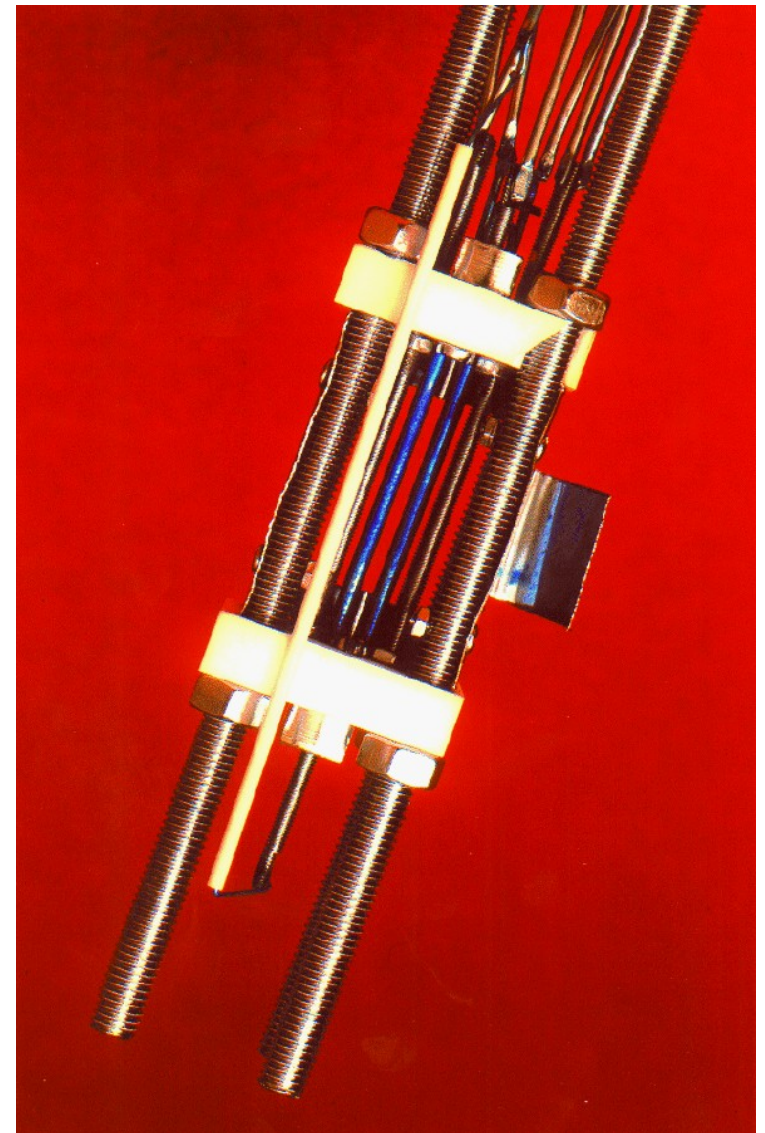
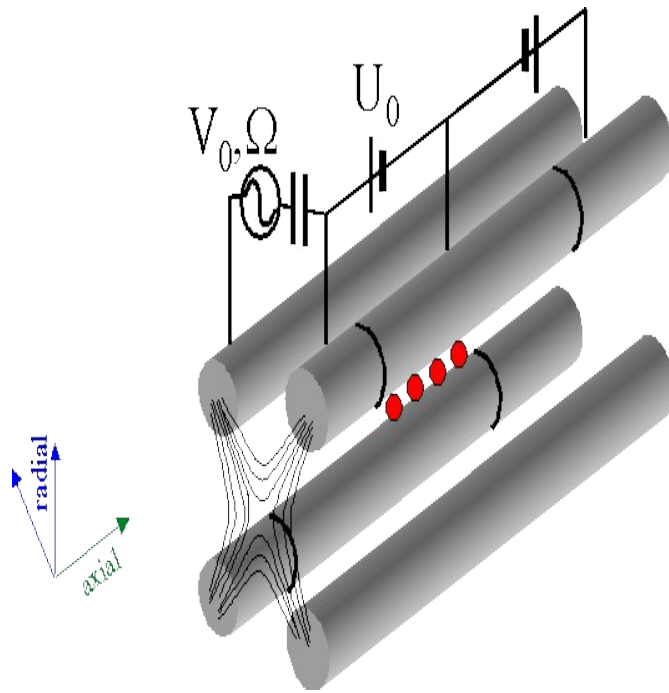
Ladd, "All Silicon Quantum Computer"  
Phys. Rev. Lett. 89, 017901 (2002)

No hay que olvidar que hasta ahora, todo se ha hecho con tecnología que es una evolución inmediata de las técnicas tradicionales de análisis NMR... hasta la teoría está evolucionando.

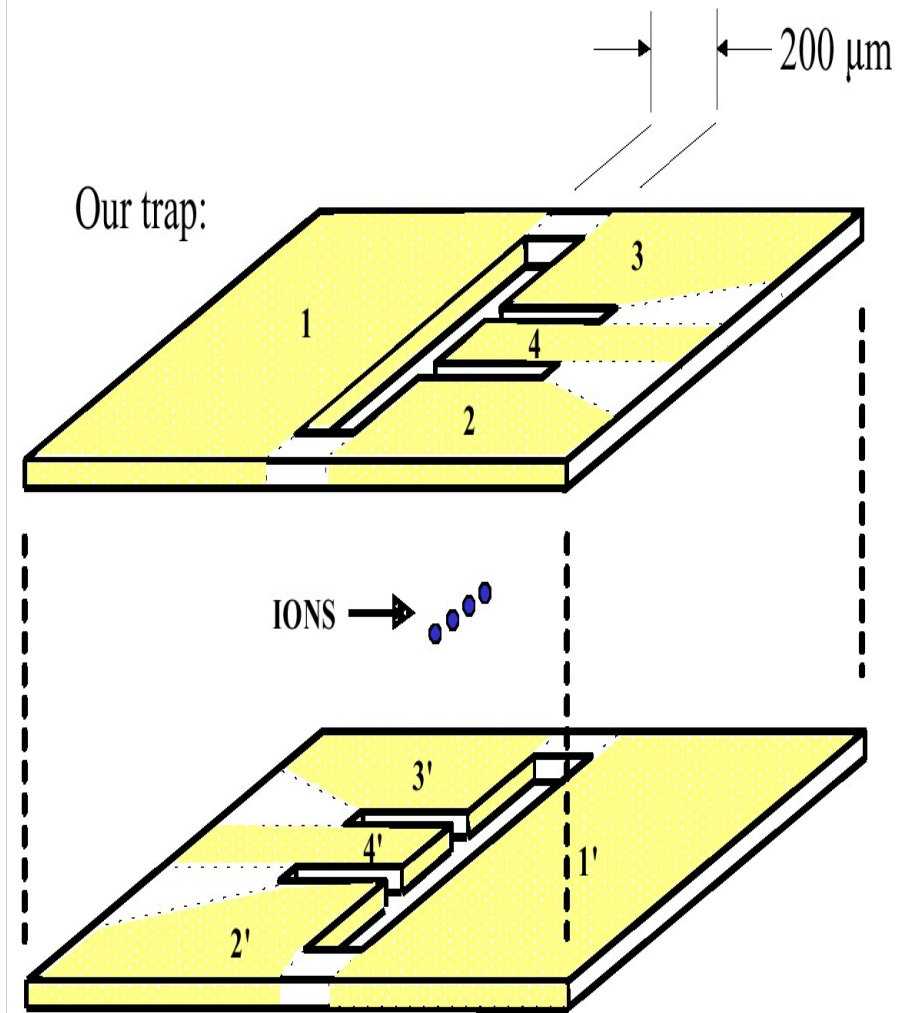
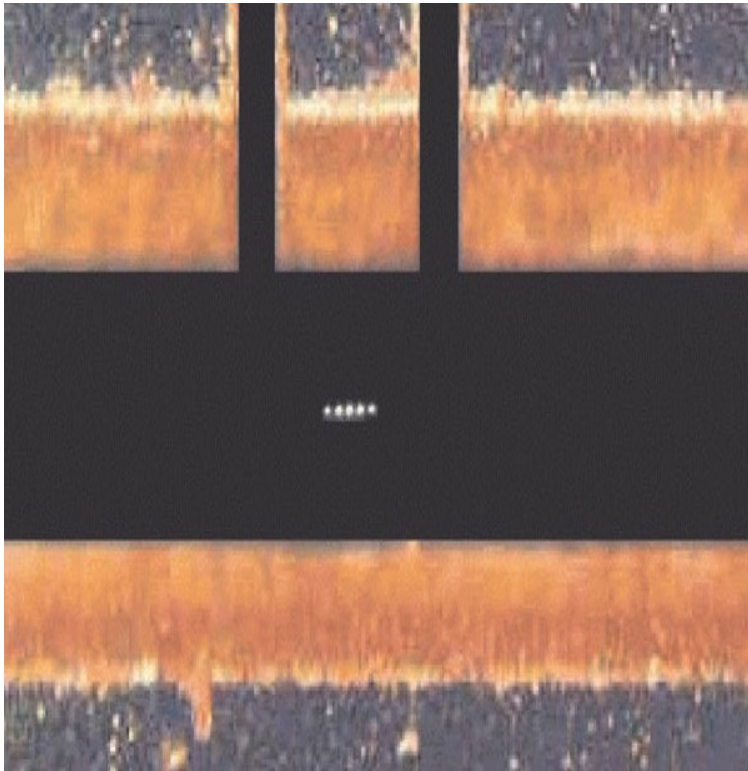
# Trampas de Iones.

- Se puede generar un potencial donde se atrapen una serie de átomos cargados.
- Se usan como qubits dos estados de energía de los iones atrapados.
  - A cada qubit se accede usando un laser de la frecuencia apropiada a la transición sobre el ión correspondiente.  Puertas individuales.
  - Puertas sobre más de un qubit requieren un mediador:  Bus de fonón.

# Trampas de Iones: Aspecto.

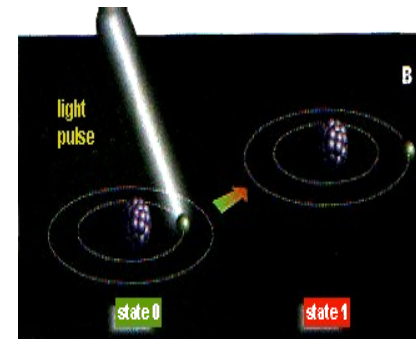
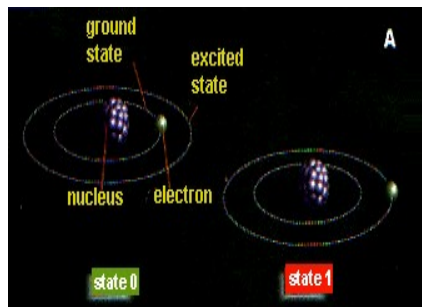


# Trampas de Iones: Microtrampa.

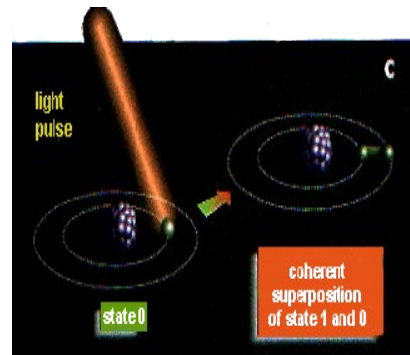


# Puertas de un Qubit: La raíz cuadrada de NOT

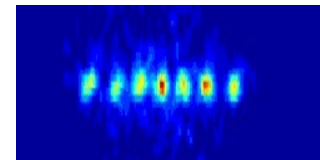
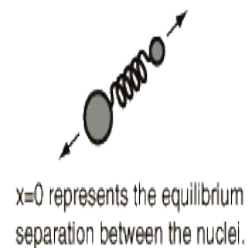
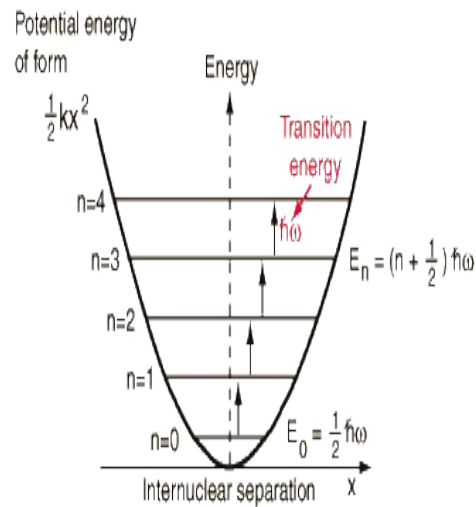
- Para realizar una operación sobre un qubit se dirige un haz de laser de la frecuencia dada por la diferencia de energía entre niveles. Esto cambia el estado, llevandolo a cero si era uno y a uno si era cero: NOT



- Usando un pulso de la mitad de la energía, obtenemos una superposición del estado cero y del uno.



# Trampas de Iones: modos.

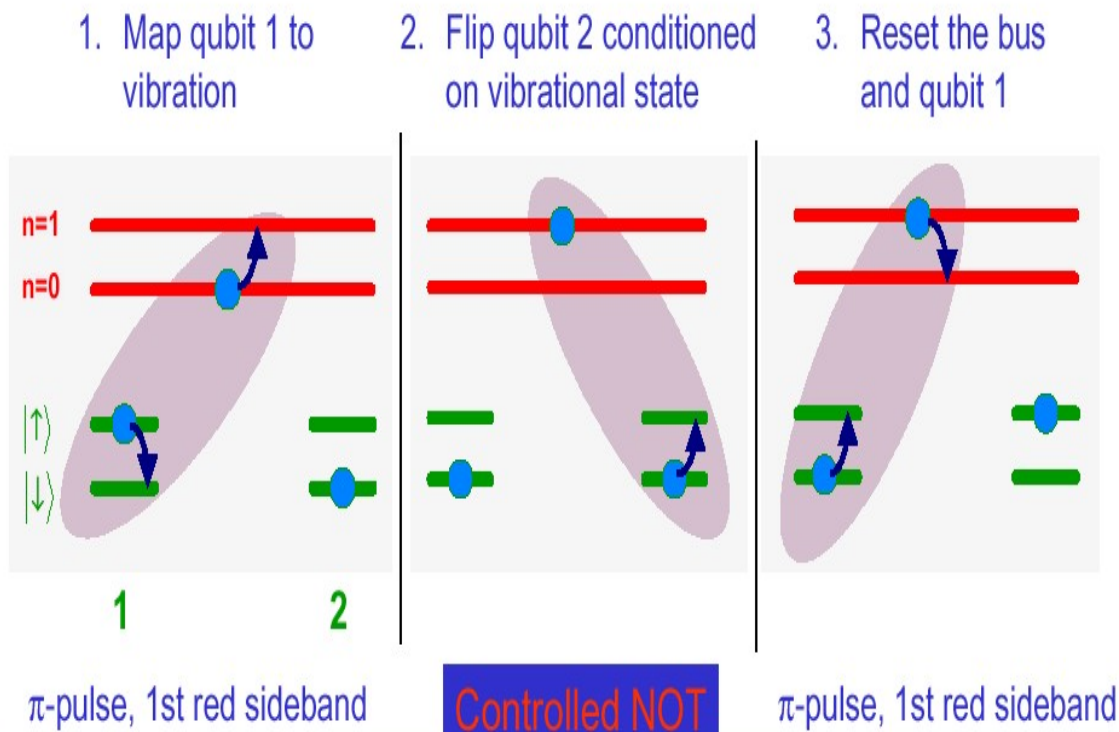


Modo 'stretch', el primer modo colectivo excitado



# Puertas entre dos qubits.

- Para mediar la interacción entre dos qubits se usan los modos colectivos de energía más baja del pozo de potencial generado por la trampa.
  - A estas excitaciones colectivas se les llama fonones.
  - El estado de un qubit en un ión se transfiere a una excitación colectiva y esta se hace interactuar con otro de los qubits en la trampa para realizar la puerta. Por esto se le llama 'bus de fonón'



Lange, TRM'99  
Esquema Cirac-Zoller

Otros Esquemas: Sorensen-Molmer,  
'Quantum Computation with Ions in  
Thermal Motion'. Phys. Rev. Lett.  
82, 1971 (1999)

# Resultados.

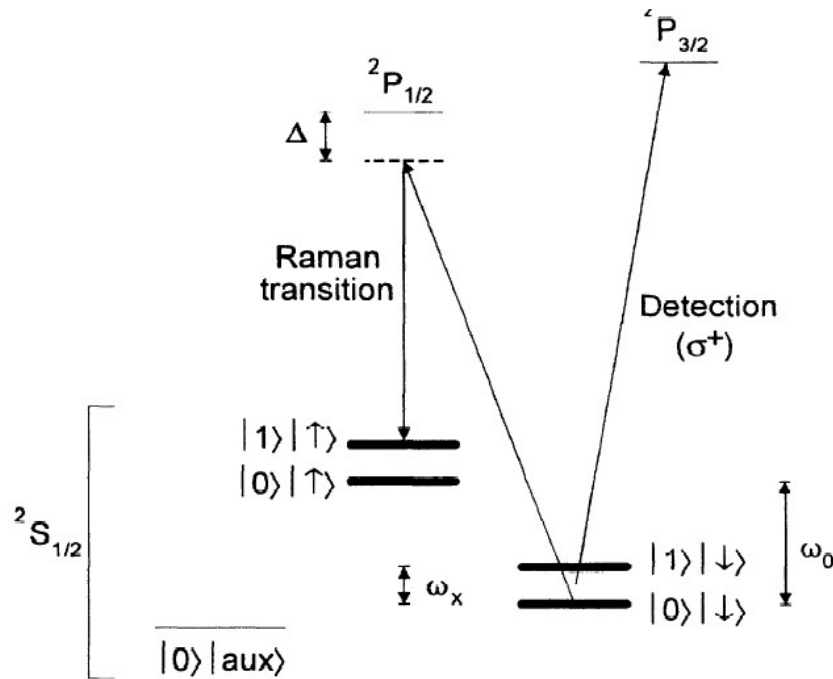
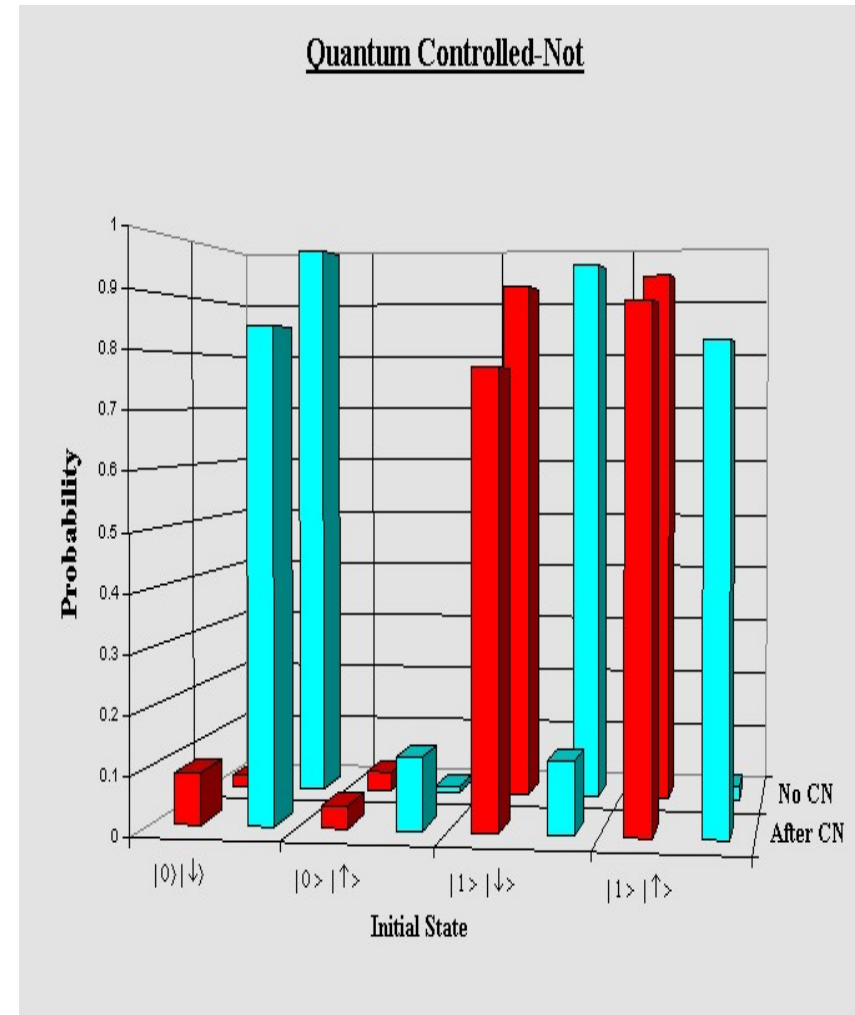


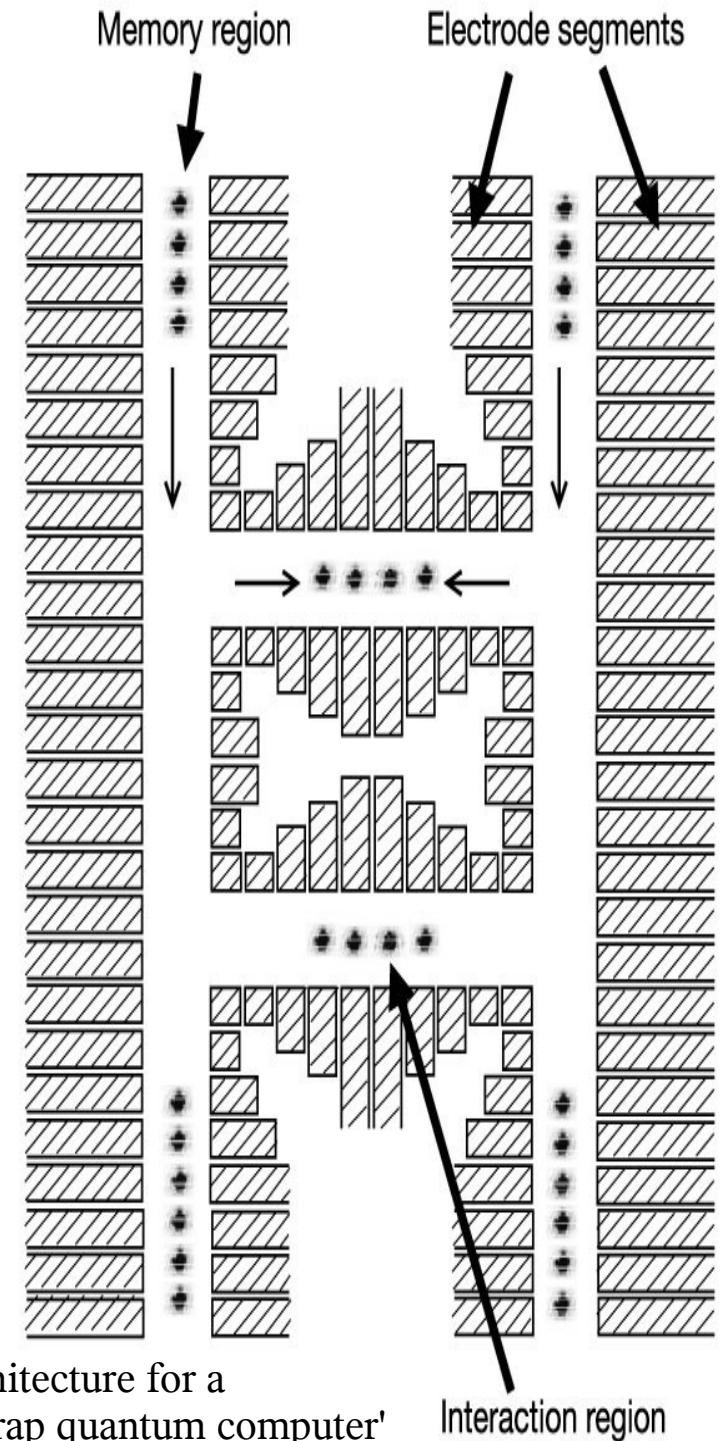
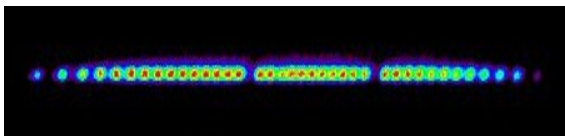
FIG. 1.  $^9\text{Be}^+$  energy levels. The levels indicated with thick lines form the basis of the quantum register: internal levels are  $|S\rangle = |\downarrow\rangle$  and  $|\uparrow\rangle$  ( $^2S_{1/2}|F=2, m_F=2\rangle$  and  $^2S_{1/2}|F=1, m_F=1\rangle$  levels, respectively, separated by  $\omega_0/2\pi \approx 1.250$  GHz), and  $|\text{aux}\rangle = ^2S_{1/2}|F=2, m_F=0\rangle$  (separated from  $|\downarrow\rangle$  by  $\approx 2.5$  MHz); external vibrational levels are  $|n\rangle = |0\rangle$  and  $|1\rangle$  (separated by  $\omega_x/2\pi \approx 11.2$  MHz).





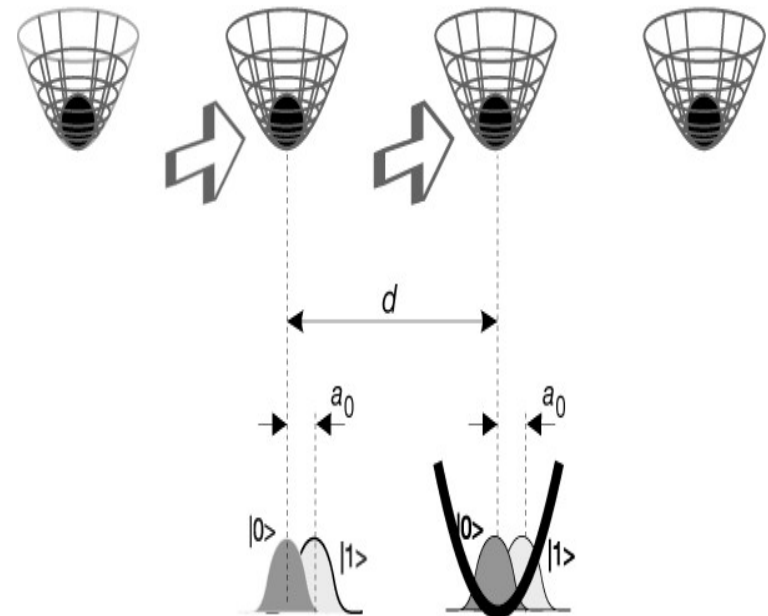
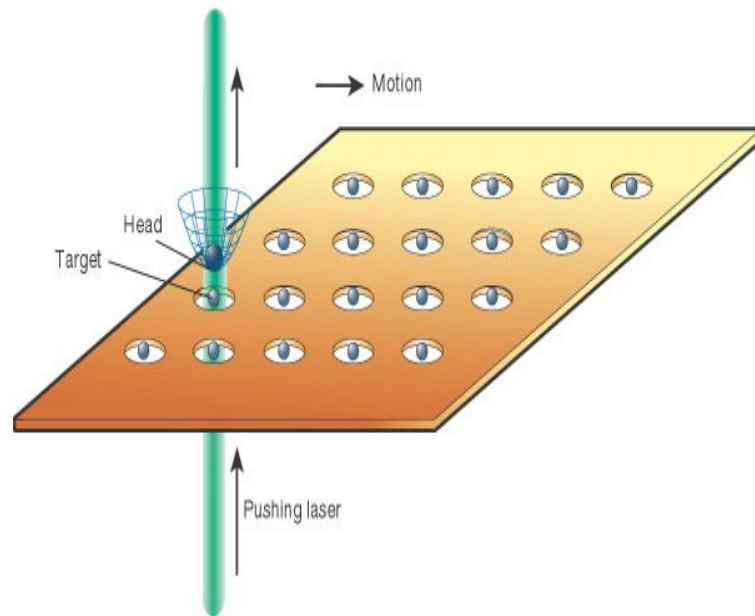
# Trampa de Iones: Problemas.

- Escalabilidad. El bus de fonón es mucho más delicado de lo que se creía. Resulta difícil mantenerlo. Se necesitan temperaturas del orden del mK  
→  
Técnicas de enfriamiento muy delicadas (laser, side-band). Aún así hay propuestas para escalarlo.



Kielpinski. 'Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer' Nature 417,709(2002)

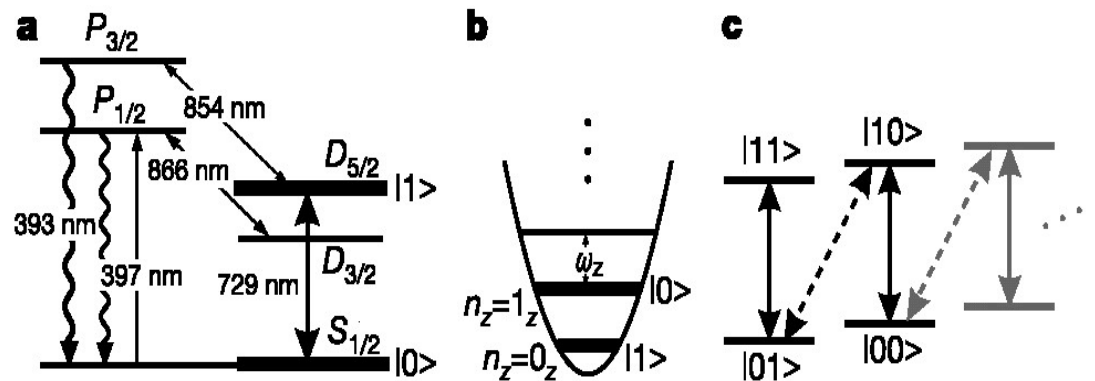
# Trampas de Iones



Cirac. 'A scalable Quantum Computer with ions in an array of microtraps', Nature 404,579(2000)

# Trampas de Iones

- Esquemas para evitar el bus de fonón, ideas derivadas de RMN.
- Implementación del algoritmo de Deutsch-Jozsa usando dos estados de un sólo ión.



**Figure 2** Quantum mechanical energy levels relevant for the ion-trap quantum computer. **a**,  $\text{Ca}^+$  level scheme. The upper and lower electronic states  $S_{1/2}$  ( $m = -1/2$ ) and  $D_{5/2}$  ( $m = -1/2$ ) of the narrow quadrupole transition ( $\tau_D \approx 1$  s) at 729 nm serve to implement one of the qubits,  $|a\rangle$ . Coherent radiation of a titanium-sapphire laser at 729 nm drives the qubit transition. Lasers at 397 nm, 866 nm and 854 nm are used for the excitation of resonance fluorescence, for Doppler cooling, and optical pumping. The laser system is described in detail elsewhere<sup>19</sup>. **b**, The lowest two number states,  $n_z = 0, 1_z$ , of the axial vibrational motion in the trap form the other qubit,  $|w\rangle$ . **c**, The combination of electronic states and energy eigenstates of the harmonic oscillator potential span the computational subspace. Numbers in ket notation denote the quantum logical values assigned to the respective states. Solid lines show carrier transitions; dashed lines show blue sideband transitions.

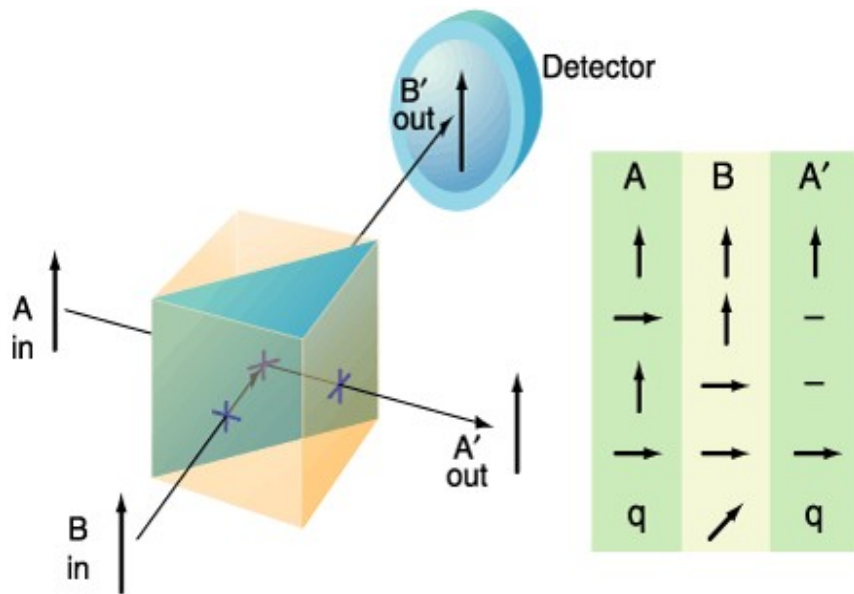
Gulde, “Implementation of the Deutsch-Jozsa Algorithm on an Ion-trap Quantum Computer”. Nature 421, 48 (2003)

# Otras propuestas: Óptica lineal

- Para hacer puertas de dos qubits (fotones):  
Tradicionalmente medios no lineales de Kerr... son casi opacos!!
- Propuestas de óptica lineal para sustituirlos. Knill, 'A Scheme for Efficient Quantum Computing with Linear Optics', Nature 409,46(2001)
  - Realización de Puertas cuánticas Pittman 'Demonstration of Nondeterministic Quantum Logic Operations Using Linear Optical Elements', Phys. Rev. Lett. 88, 257902 (2002)
    - Probabilistas, postselección.
  - Algoritmos de D-J y B-V con 3 qubits.
    - Brainis 'Fiber-Optics Implementation of the Deutsch-Jozsa and Bernstein-Vazirani Quantum Algorithms with Three Qubits', Phys. Rev. Lett. 90, 157902 (2003)
    - Takeuchi, 'Experimental Demonstration of a 3-qubit Quantum Computing Algorithm Using a Single Photon and Linear Optics'. Phys. Rev. A 62, 032301 (2000)

# Otras Propuestas: Óptica Lineal

- Ejemplo de puerta cuántica:



**The quantum parity check gate.** This gate transfers the input qubit A to the output qubit A' if its value is the same as that of input qubit B. If both inputs are **1** (vertically polarized photons), both will be reflected at the beam-splitter. If both are **0** (horizontally polarized), both will be transmitted. In either case, a single count in the detector means that the gate has transferred the value of A to A'. If the two input polarizations differ, either both or neither of the photons is registered in the detector, and the gate fails. The gate also works when the inputs are in superposition states (6).

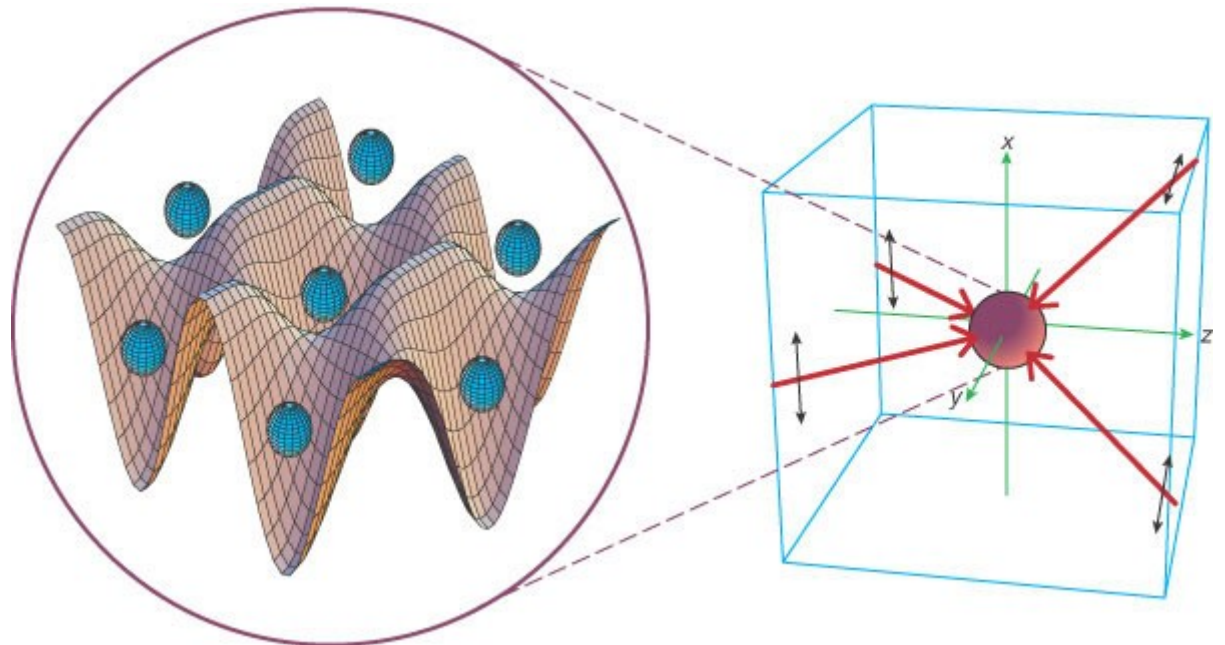
Shields, 'Quantum Logic with Light, Glass, and Mirrors'. Science 297, 1821 (2002)



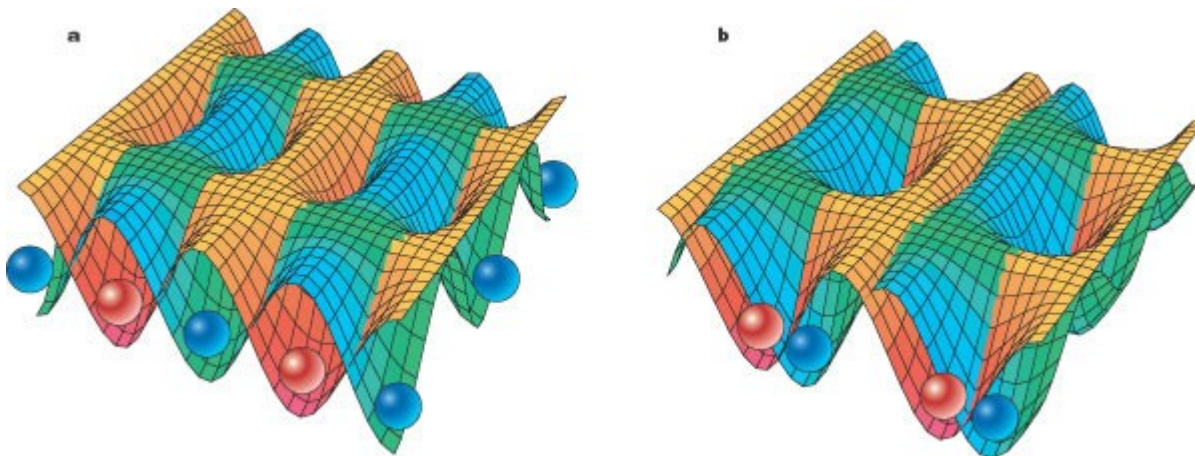
# Otras Propuestas: Red Optica

- Átomos Neutros.
- El potencial óptico depende del estado interno: Se pueden acercar para puertas de dos qubits.
- También vía colisiones

Brennen, 'Quantum Logic Gates in Optical Lattices', Phys. Rev. Lett. 82,1060(1999)



Rolston, NIST

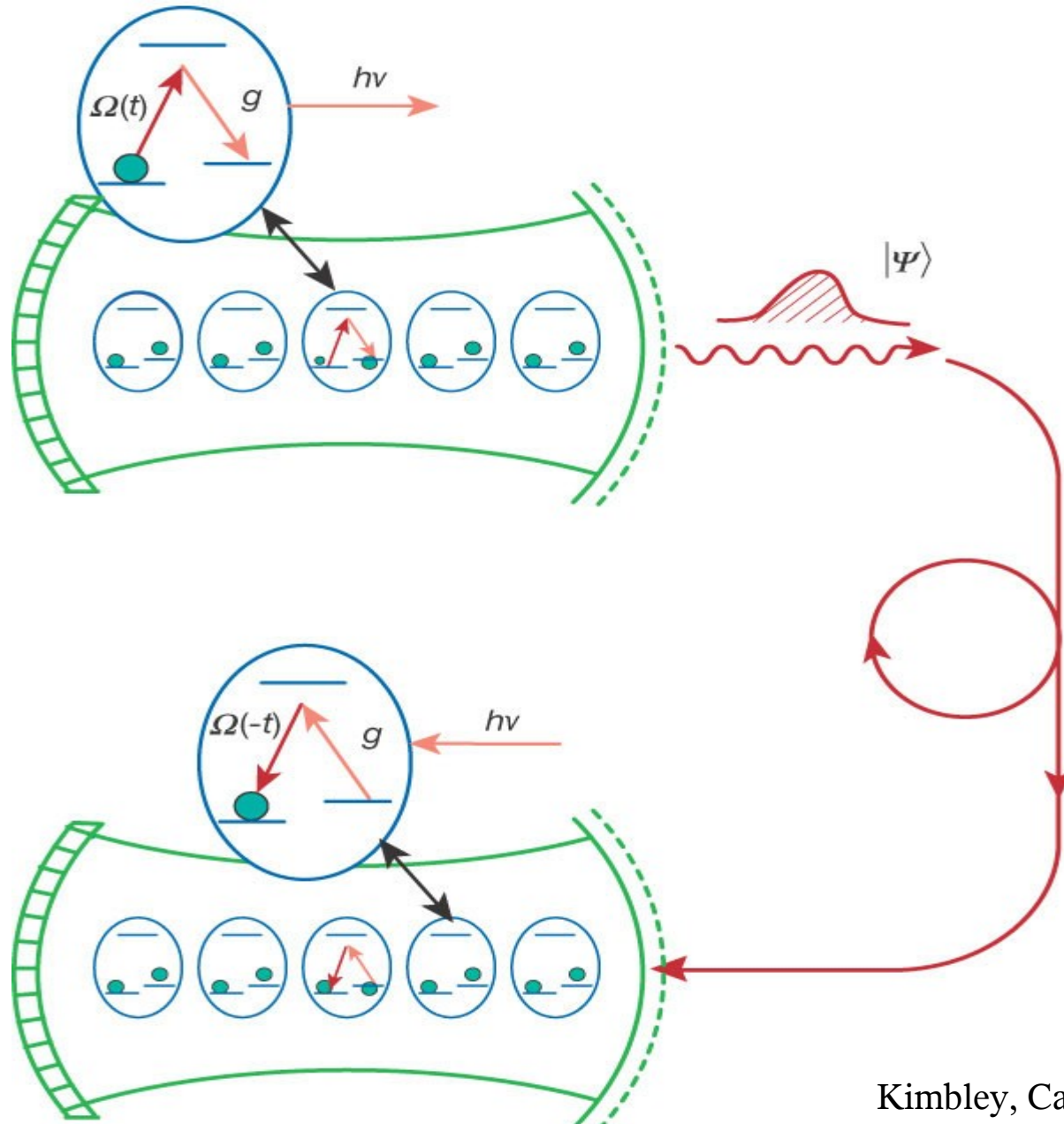


Deutsch, U. New Mexico

# Otras propuestas: Fotones+cavidades

- Los fotones son transportes de qubits casi ideales... pero resulta muy difícil hacer operaciones de dos qubits con ellos.
- Se pueden usar cavidades ópticas para hacer interaccionar un sólo fotón con un sólo átomo. Cirac. Phys. Rev. Lett. 78,3221(1997)
  - Así se realizan puertas lógicas y comunicación:
    - Qubits de fotón para comunicaciones.
    - Qubits en cavidades/trampas para puertas y almacenamiento.
- Los esquemas de óptica lineal y de fotones + cavidades pueden encontrar un uso importante en criptografía cuántica.

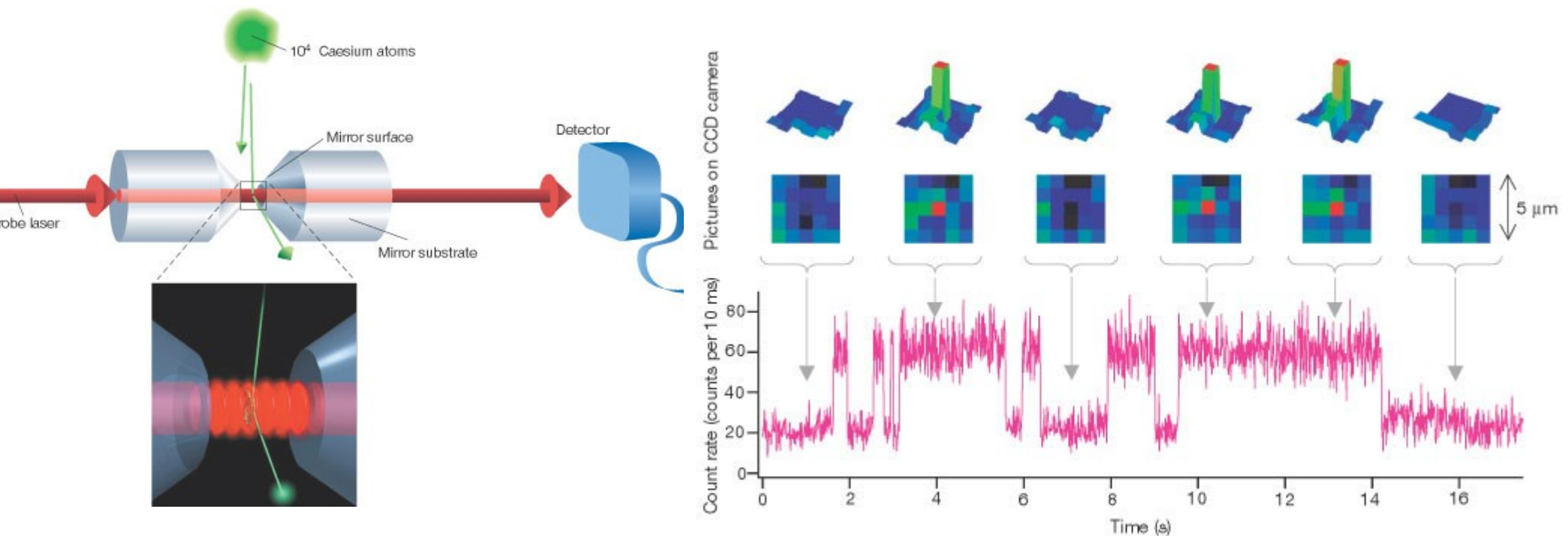
# Fotones + Cavidades





# Fotones + Cavidades: Problemas

- Se necesita controlar la interacción de un sólo átomo/un sólo fotón dentro de una cavidad. Para evitar decoherencia este acoplo tiene que ser muy fuerte  $\rightarrow$  Cavidades muy pequeñas y reflectivas.

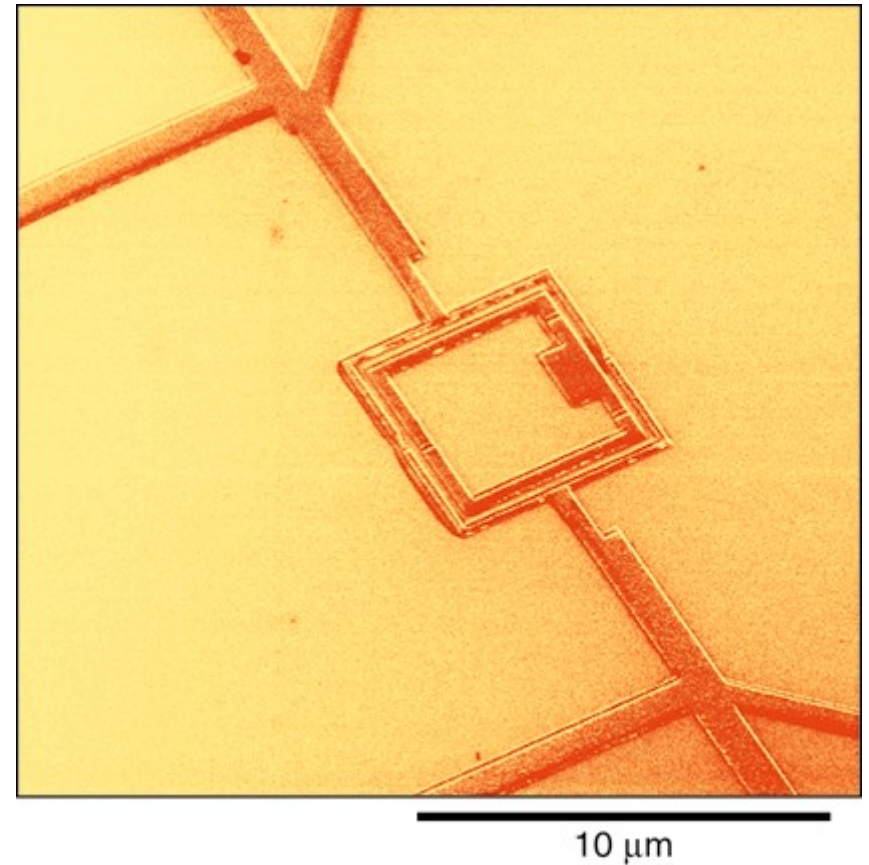
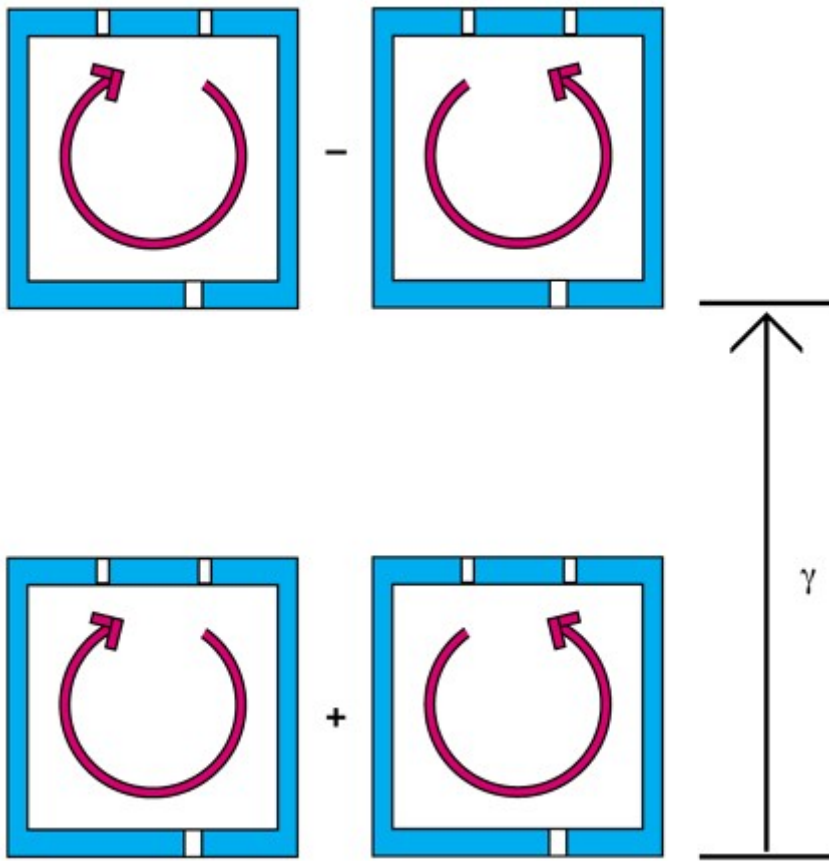


# Otras Propuestas: Microelectrónica, Superconductores.

- Basadas en uniones Josephson: lazos cerrados de superconductor interrumpidos por una o más finas secciones de aislante (unión josephson) a través de las que se establece una corriente tunel.
  - Qubits de flujo magnético
  - Qubits de carga.
  - ... y también diseños híbridos.

# Superconductores: Qubit de flujo

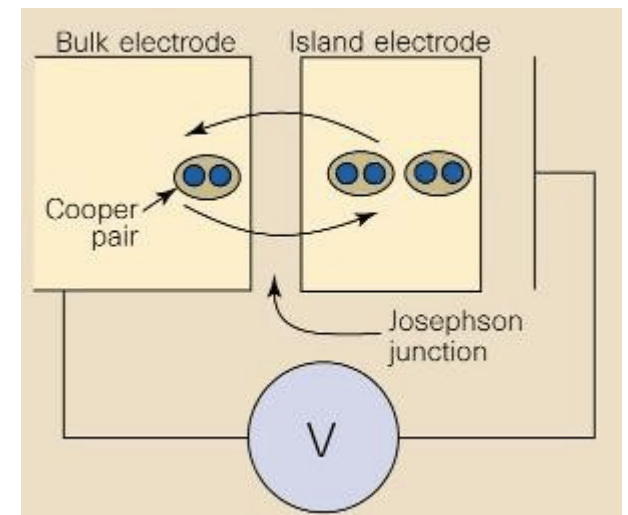
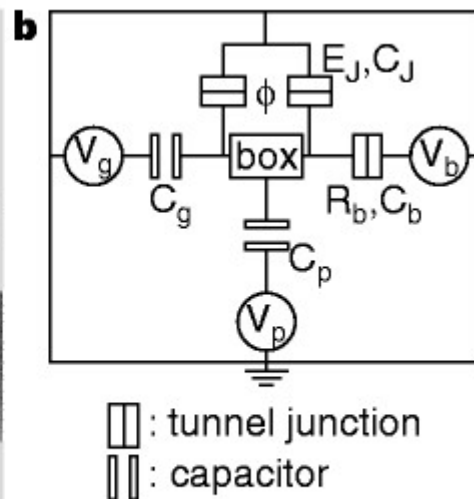
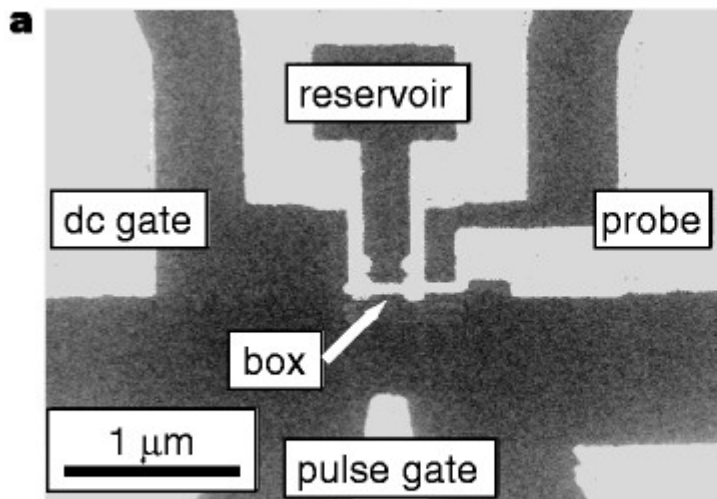
- Dentro del anillo superconductor el flujo magnético está cuantizado. Los qubits se corresponden a distintos estados de flujo.



Van der Wal, 'Quantum Superposition of Macroscopic Persistent-Current States'. Science 290, 773 (2000)

# Superconductores: Qubit de carga.

- El qubit de carga: Los autoestados  $|0\rangle, |1\rangle$  se corresponden con estados con  $N$  y  $N+1$  pares de Cooper



Caja de un par de Cooper

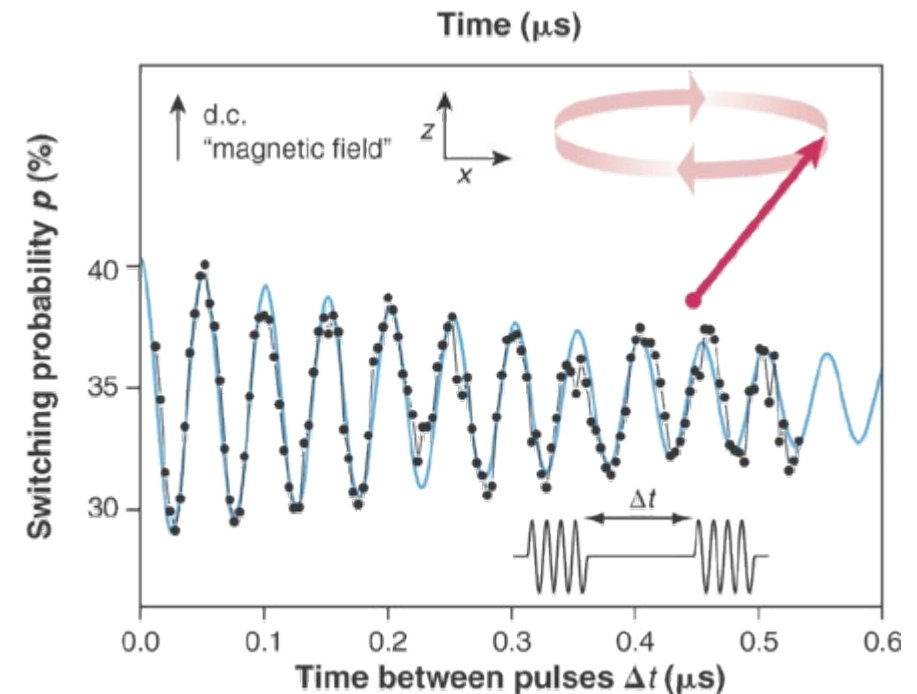
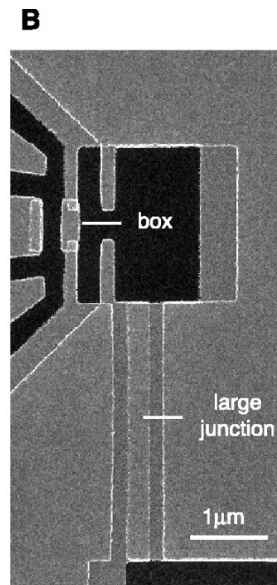
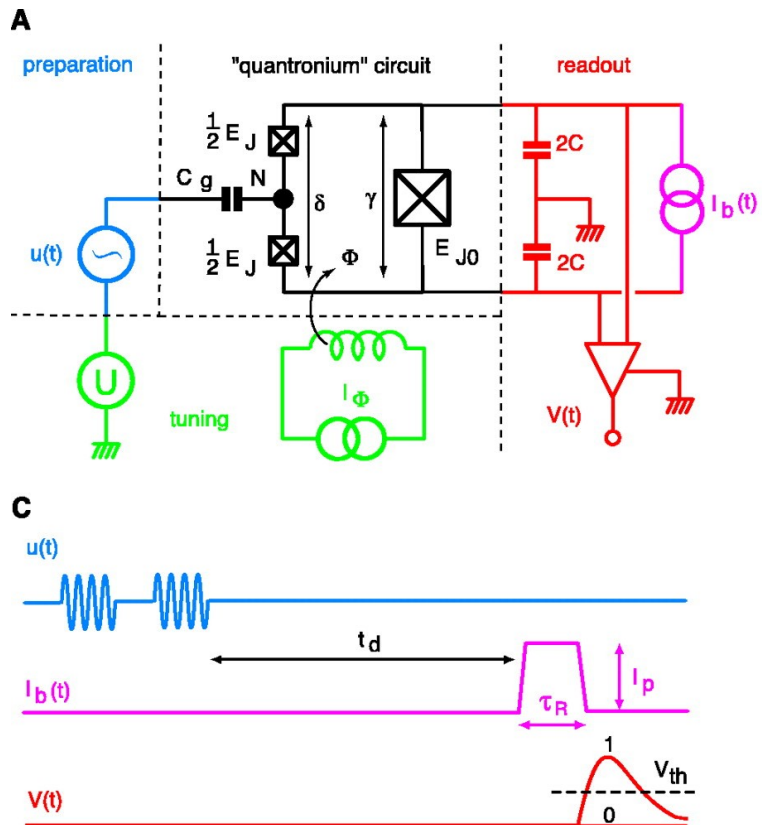
# Qubits Superconductores: Caracterización.

- Muy similar a la de NMR.
  - La constante temporal que nos decía cuanto tiempo estábamos en el plano XY era  $T_2$  (espín-espín).
    - En terminología SC este tiempo se denomina 'Tiempo de relajación de fase'  $T_\phi$
  - En SC la magnitud que caracteriza los tiempos de coherencia se define en función de la frecuencia de Larmor  $\nu$  como

$$Q_\phi = \frac{1}{2} T_\phi \nu$$

Para poder hacer QC con SC se estima que debe ser del orden de  $10^4$   
En lo que hemos visto es de aproximadamente 50....

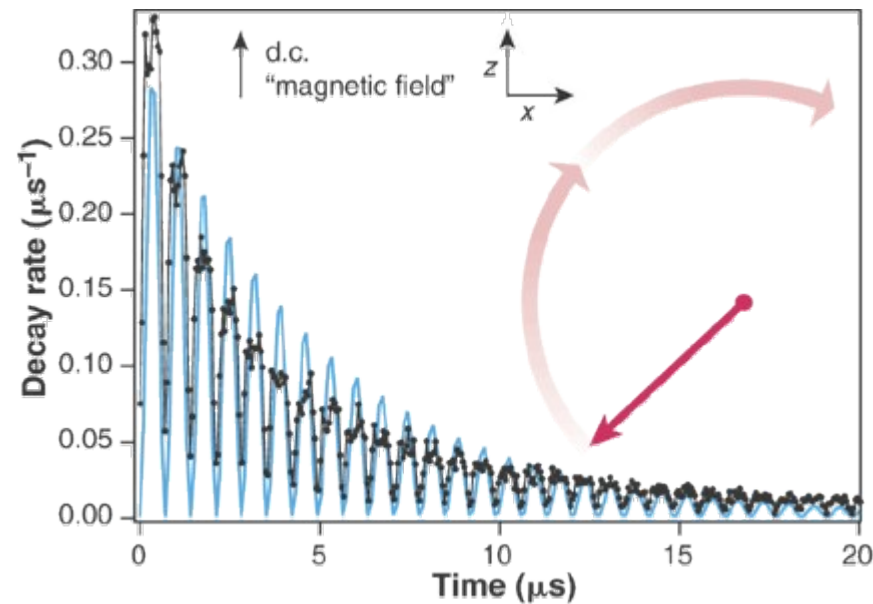
# Superconductores: Híbridos



$Q_\phi = 2.5 \times 10^4$  Sin ambigüedad,  
medido directamente

Vion. 'Manipulating the Quantum State of an Electrical Circuit' Science 296,886 (2002)

# Superconductores: Híbridos.



$Q_\phi \sim 2 \times 10^5$  Estimado, no medido directamente.

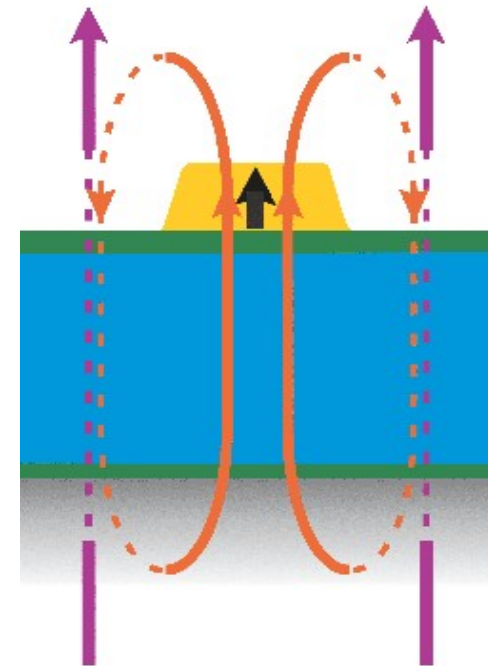
# Superconductores: Futuro

- Con los últimos diseños parece una de las tecnologías más prometedoras.
  - Pero siguen siendo bajas temperaturas. Tecnología difícil, no apta para consumo masivo...
- Corto plazo: 'Computación cuántica tipo II'
  - Circuitos SC con unos pocos qubits que son acoplados clásicamente a otros circuitos similares. Muy rápidos, incluso clásicamente:
    - Navier-Stokes, autómatas celulares.  $> 100\text{ GHz}$



# Superconductores: Futuro

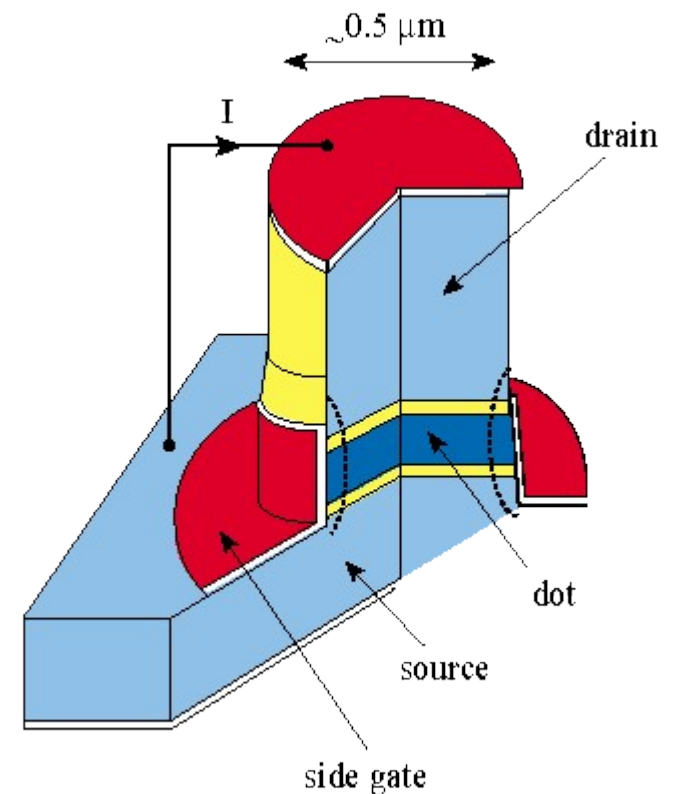
- Ingeniería de materiales para superconductores.
  - Un campo magnético destruya la superconductividad... excepto en algunos casos raros.
  - Se pueden usar puntos magnéticos para recuperar SC en nanoescalas: construir anillos donde se pueden almacenar qubits.



Lange, “Nanoengineered Magnetid-field-induced Superconductivity”. Phys. Rev. Lett 90, 197006 (2003)

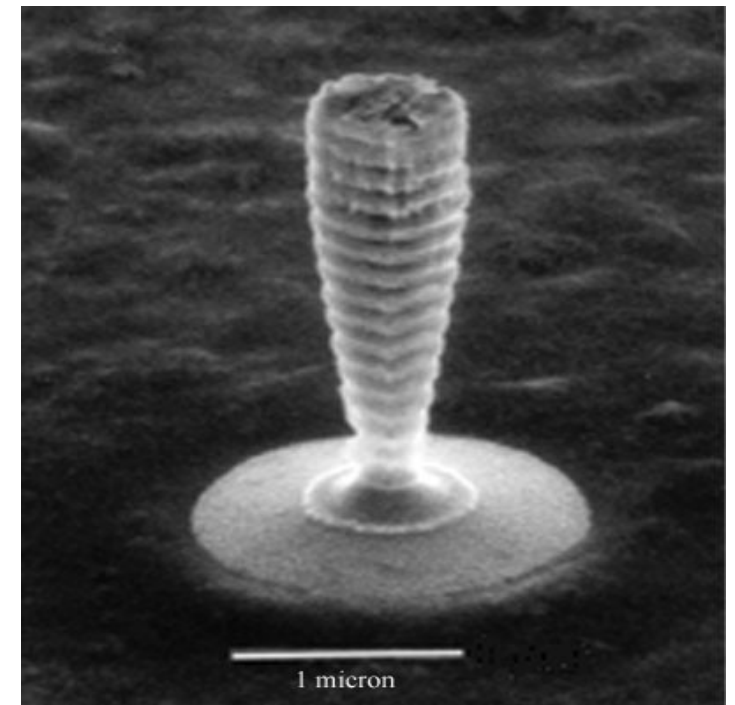
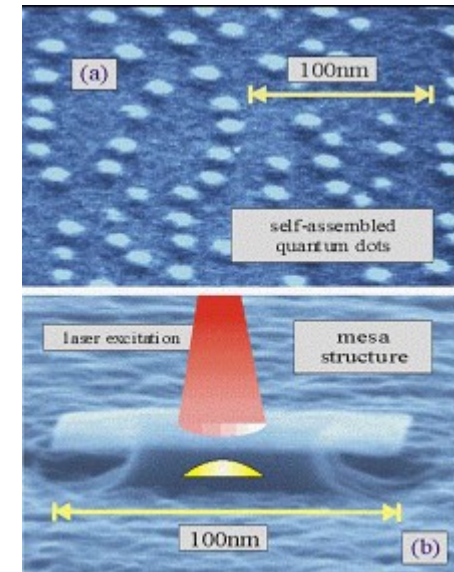
# Microelectrónica: Puntos Cuánticos

- Un punto cuántico es una estructura semiconductor que es capaz de contener un electrón en estados discretos. Por este motivo también se les llama 'átomos artificiales'. Sus niveles de energía vienen determinados por sus dimensiones y forma, además de por su estructura.



# Puntos Cuánticos.

- Un punto cuántico puede excitarse con un laser de la frecuencia adecuada. Se le pueden ir añadiendo electrones formando una especie de 'tabla periódica artificial'
- Ya vimos que también pueden generar fotones individuales. El problema es recolectarlos. La estructura que se ve aquí es un cristal crecido con ese fin.

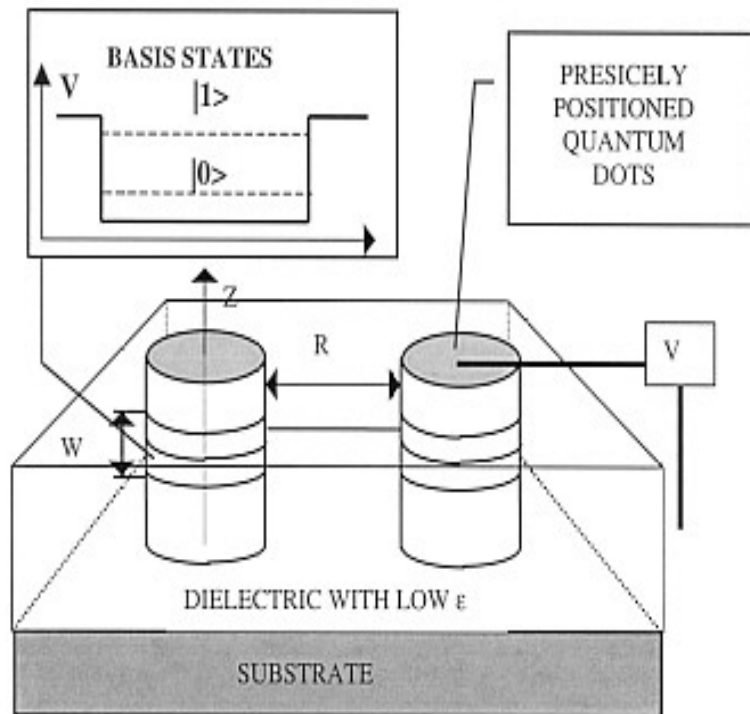


·Michler, 'Generacion de fotones individuales usando un qdot'  
Science 290, 2282(2000)

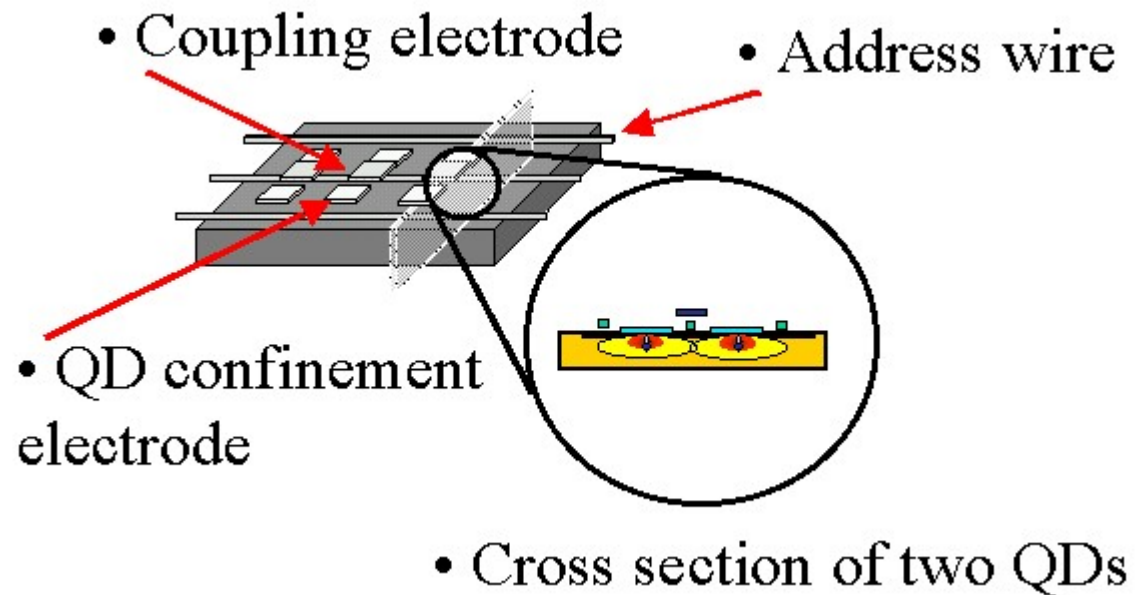
·Santori, 'Triggered Single Photons from a Quantum Dot', PRL,  
cond-mat/0012379 [No corresponden con la figura]

# Puntos Cuánticos: Propuestas

- Siendo tan variadas las posibilidades de los puntos cuánticos, también las propuestas lo son:



Control óptico



Control electrónico

# Puntos Cuánticos: Status.

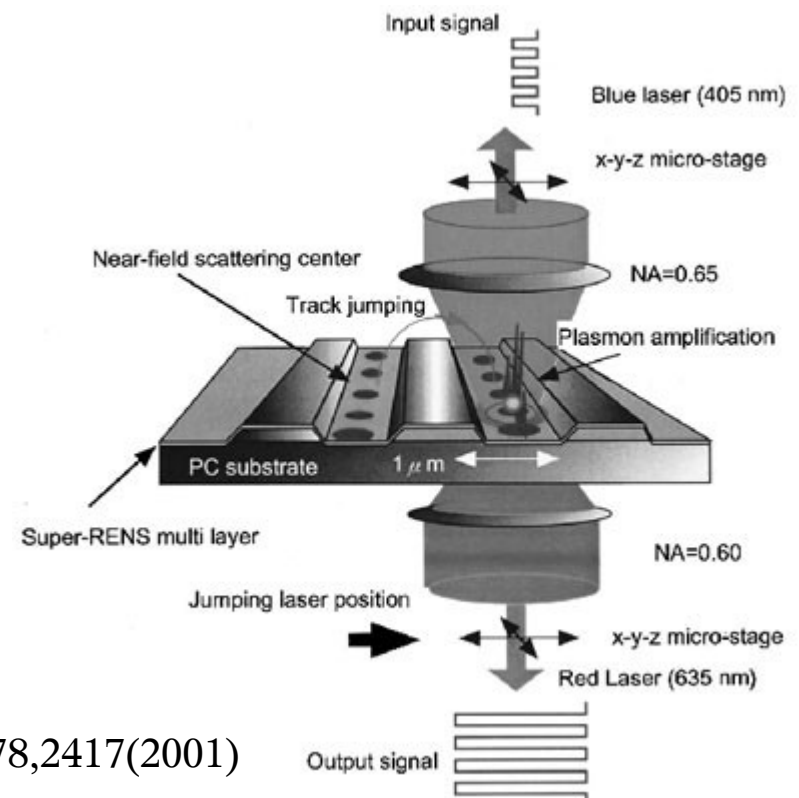
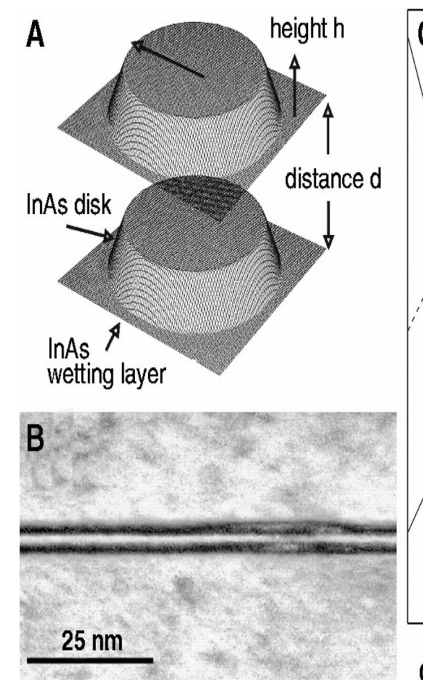
- A pesar de perspectivas pesimistas... (tiempos de coherencia bajos, problemas con la medición...)
  - Hu, 'Theoretical Issues in Spin-Based Quantum Dot Quantum Computation'. cond-mat/0102019
- Teleportación y estados GHZ en puntos cuánticos
  - Reina, 'Quantum Teleportation in a Solid State System Quantum Dots', cond-mat/9906034
  - Reina, 'Quantum Entanglement and Information Processing via Excitons in Optically-Driven Quantum dots', quant-ph/9911123
- Diseño de memorias cuánticas avanzado.
  - Friesen, 'Design and Proof of Concept for Silicon-Based Quantum Dot Quantum Bits', cond-mat/0204035

# Puntos Cuánticos: Aplicaciones Relacionadas

- Y además se pueden acoplar en sistemas (moléculas) de puntos cuánticos, con nuevas propiedades...

Bayer,  
'Coupling and Entangling of Quantum States in Quantum Dot Molecules', Science 291,451(2001)

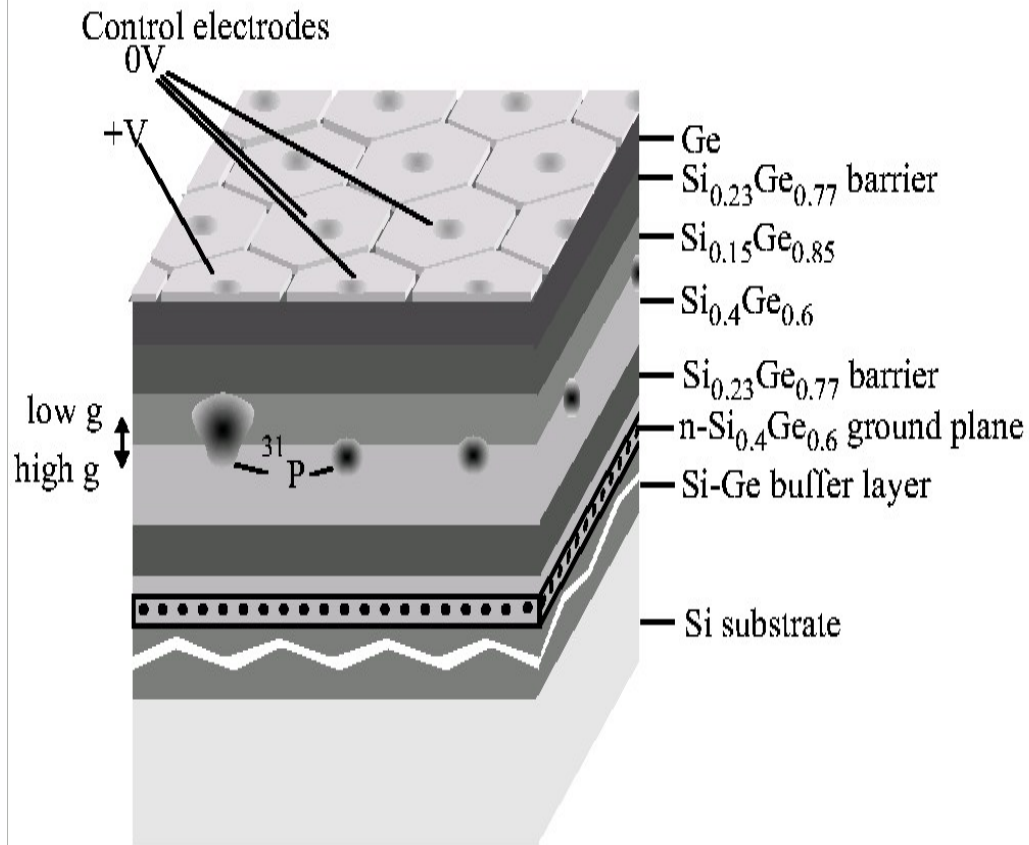
- O para hacer un laser o un transistor fotónico... con ganancia!



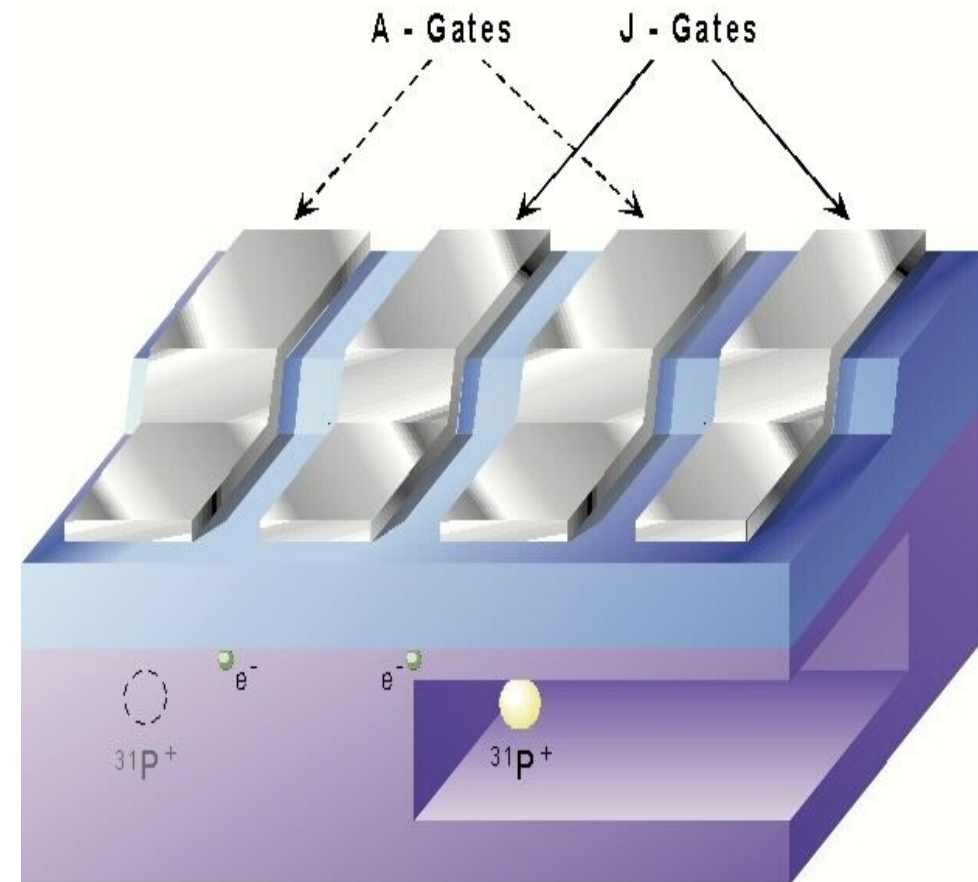
Tominaga, 'Local Plasmon Photonic Transistor', App. Phys. Lett. 78,2417(2001)



# Otras Propuestas: Atomos Donantes

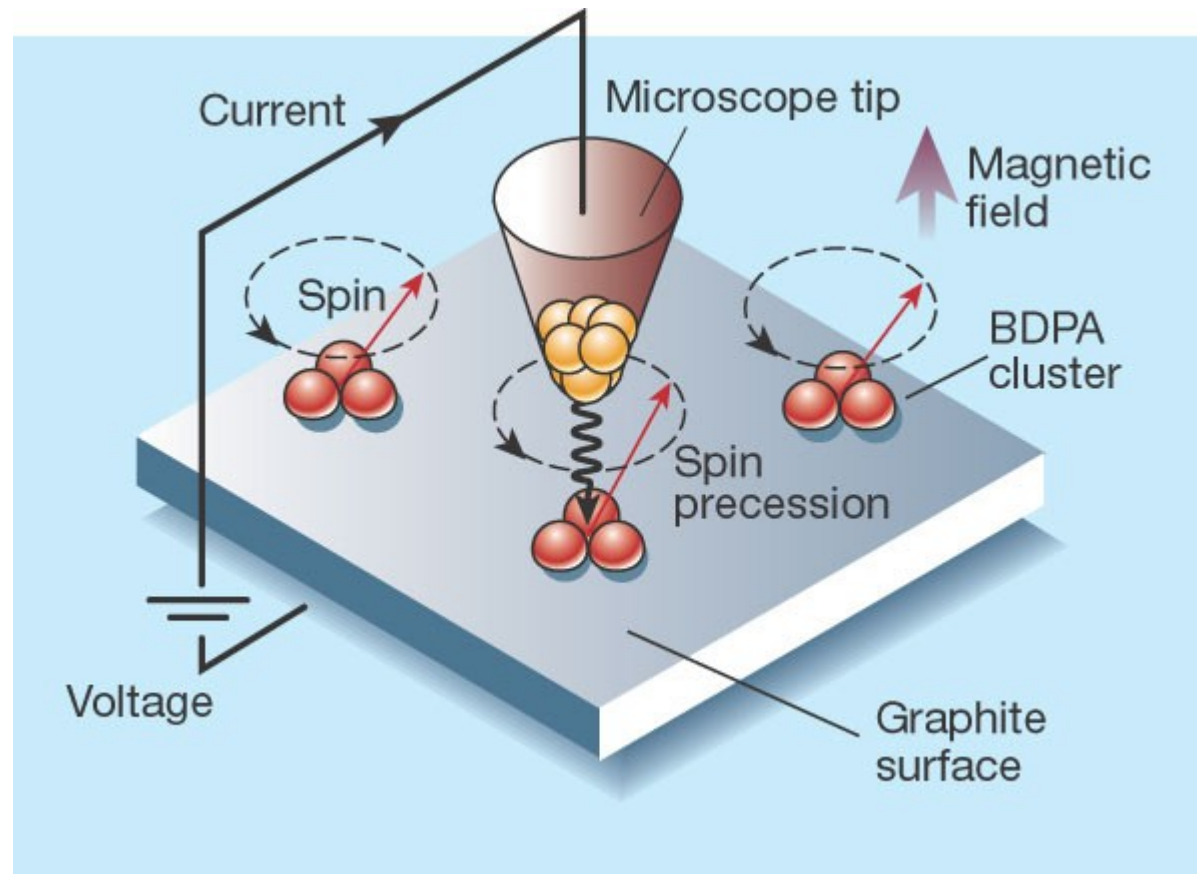


Vrijen, 'Electron Spin Resonance Transistors for Quantum Computing in Silicon-Germanium Hetero-structures' quant-ph/9905096



Kane, 'A Silicon-based Nuclear Spin Quantum Computer', Nature 393,133(1998)

# Otras Propuestas: Moléculas Adsorbidas



Nature 416,24(2002)



# Otras Propuestas: Moléculas Adsorbidas

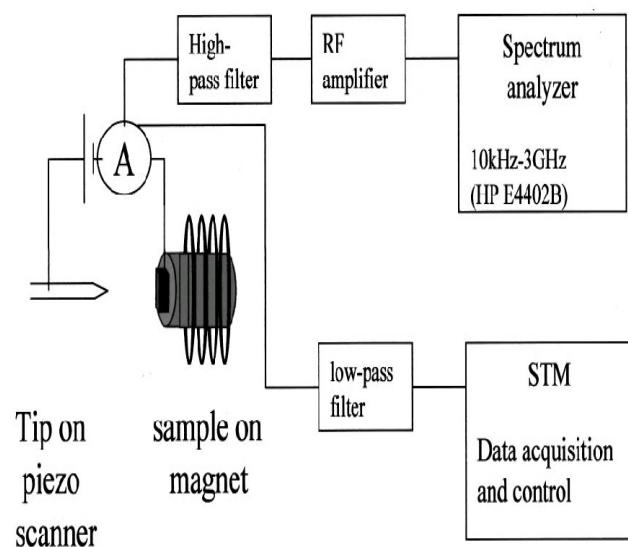


FIG. 1. Schematic of the electronics used in STM-ESR.

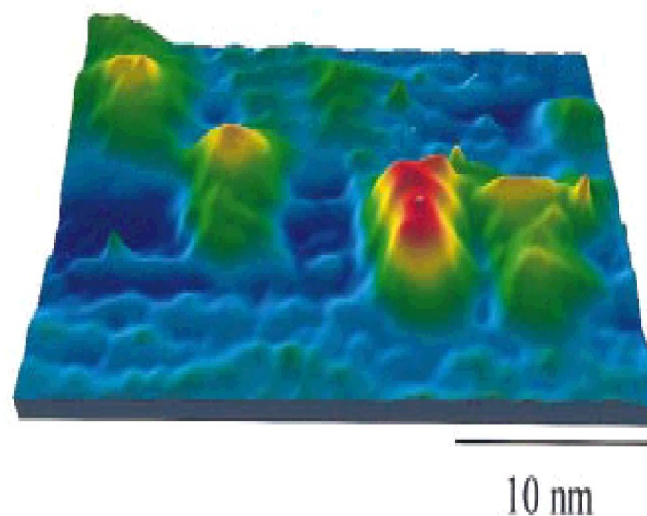
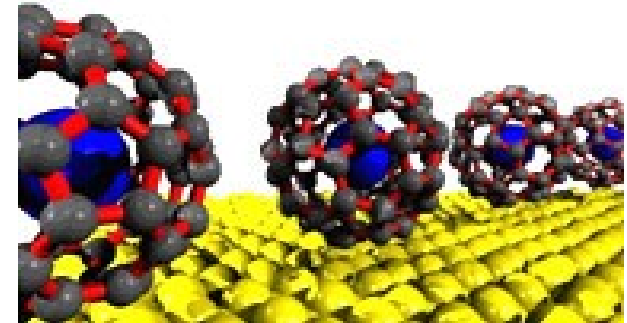


FIG. 2. (Color) STM image of a  $250 \text{ \AA} \times 150 \text{ \AA}$  area of HOPG with four adsorbed BDPA molecules.

Durkan, 'Electronic Spin Detection in Molecules Using Scanning-Tunneling Microscopy-Assisted Electron-Spin Resonance', App. Phys. Lett. 80,458(2002)

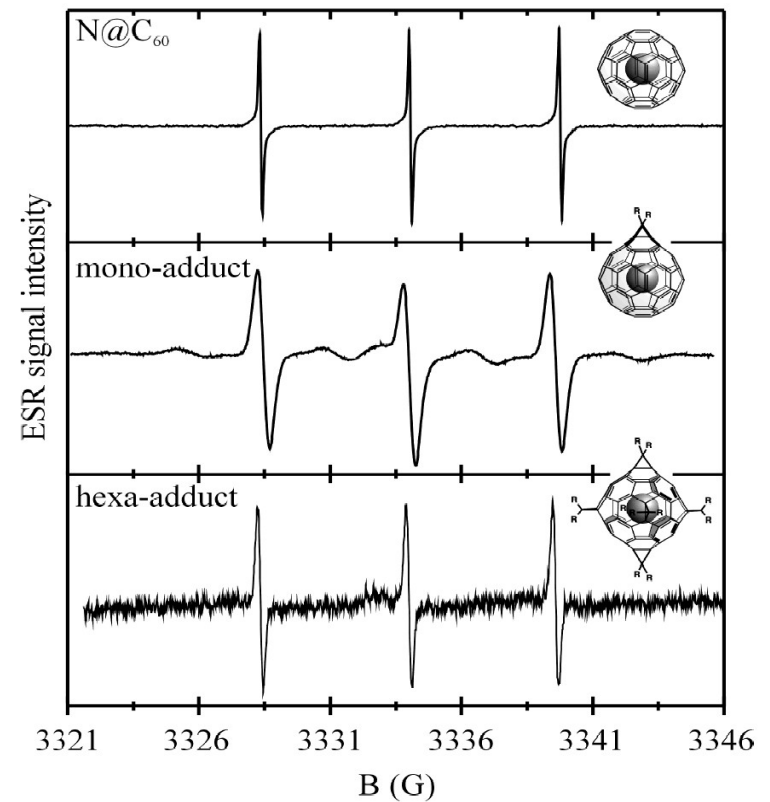
# Usando Fullerenos Funcionalizados



- Jaulas de Carbono (  $C_{60}$  o  $C_{70}$  ) casi esféricas con un átomo en su interior.
- El átomo, típicamente nitrógeno o fósforo (  $N @ C_{60}$  o  $P @ C_{60}$  ), queda aislado en el interior con propiedades cuasi-atómicas.
- La jaula lo hace posicionable sobre la superficie utilizando la punta de un STM
- Accesible via pulsos de resonancia de espín (ESR).
- Sistema estable a temperatura ambiente.

# Fullerenos Funcionalizados

- El átomo endoedroal produce espectros ESR muy limpios, incluso en jaulas modificadas.
- Tiempos de relajacion  $T_1$  y  $T_2$  largos (desde  $100 \mu\text{s}$  a  $T_1$  ambiente hasta varios seg a 5K para  $T_1$  y de  $20 \mu\text{s}$  para  $T_2$ )
- La jaula tampoco se ve afectada: Se pueden usar técnicas químicas para conseguir cadenas con los fullerenos a distancias precisas uso en disolución.



Knorr, "Electron Spin Relaxation Rates  $T_1$  and  $T_2$  in diluted solid  $N@C_{60}$ ". AIP proceedings 2000

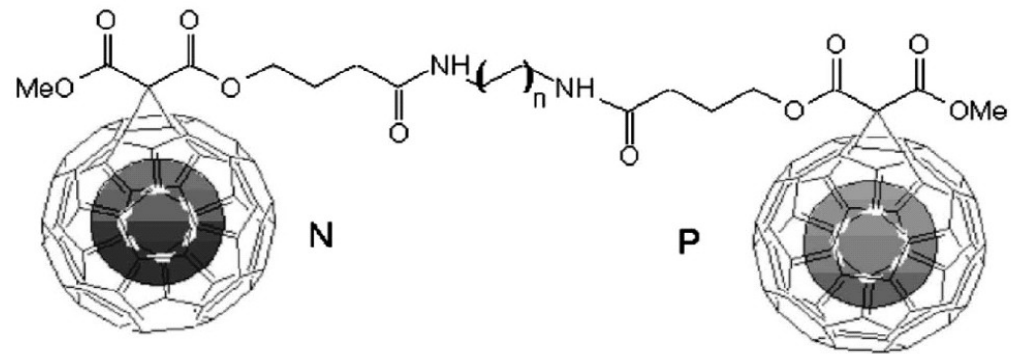
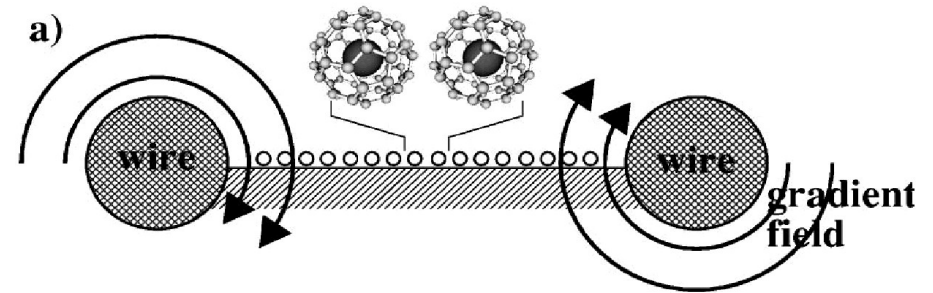


FIG. 5. Construction of a bimolecule from two different endohedrals by the key-keyhole principle. A realistic heteroendohedral Harneit, "Fullerene-based Electron-spin Quantum Computer" Phys. Rev. A 65, 032322, 2002



# Fullerenos Funcionalizados

- Además del electrónico se puede usar el espín nuclear.
- Direccionamiento local:
  - Usando HW específico
  - Gradientes magnéticos
- Puertas de dos qubits:
  - Se usa el acoplo dipolar, que depende del ángulo.
  - Funcionamiento como autómata celular.
  - Uso de más de una especie



Suter, "Scalable Architecture for Spin-based Quantum Computer with a Single Type of Gate" Phys. Rev. A 65, 52309 (2002)

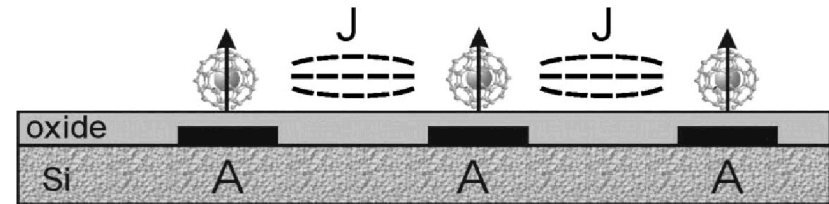
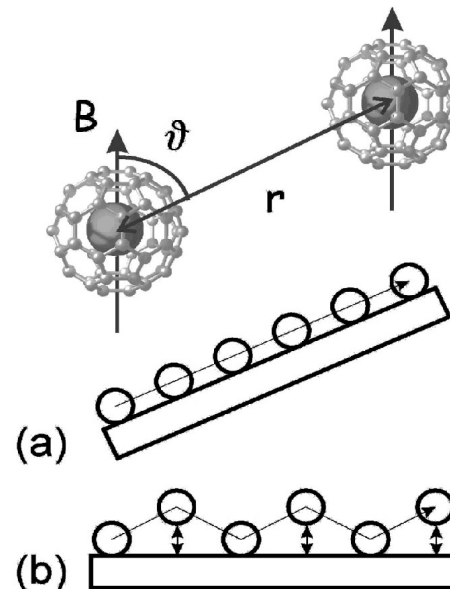


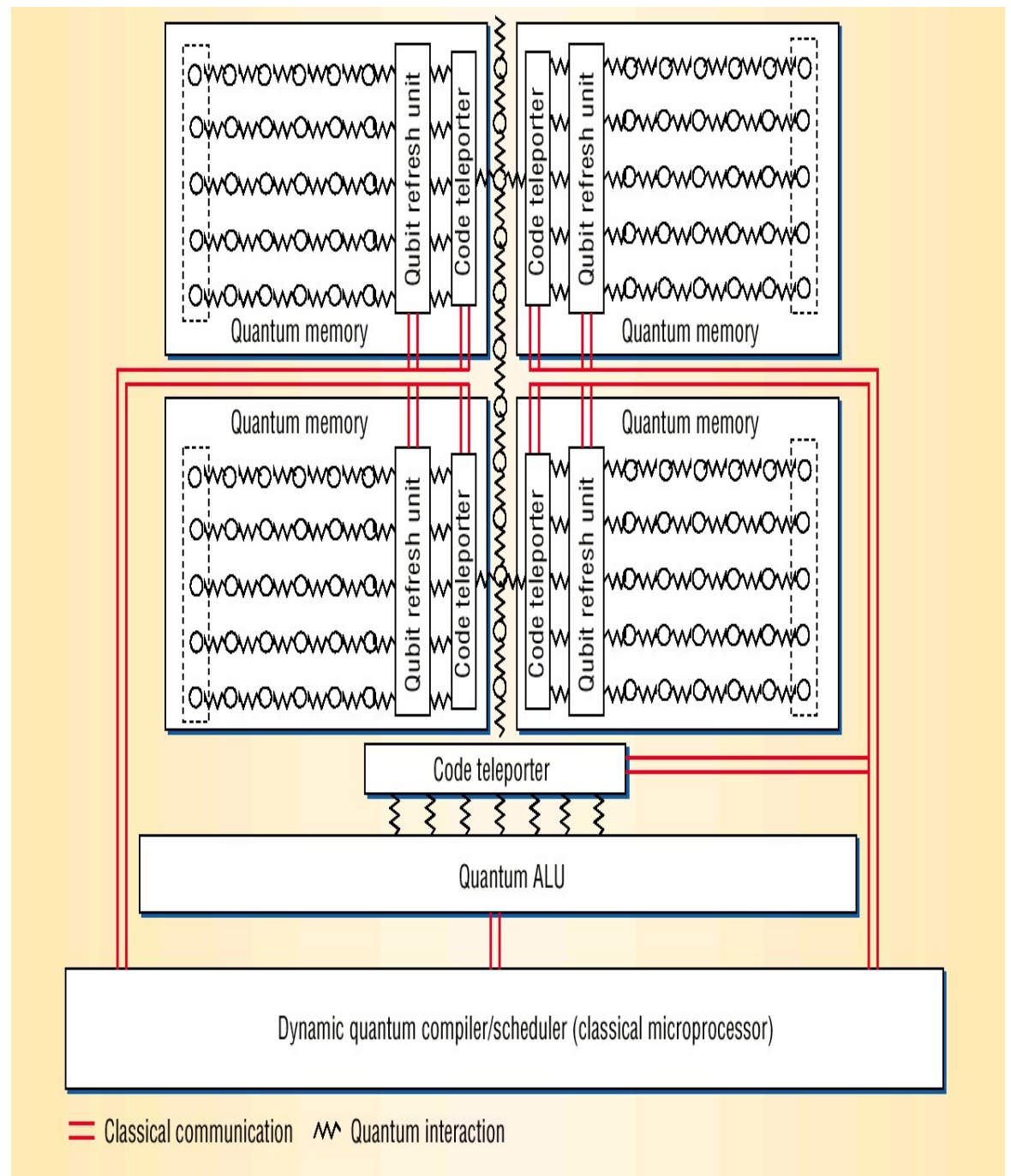
FIG. 1. Conceptual figure for a solid-state quantum computer using the electron spins (arrows) of endohedral fullerenes as qubits.



Harneit, op. Cit.

FIG. 4. Methods to control the dipolar coupling  $J(\vartheta)$ , see

# Ordenador Cuántico de Propósito General.

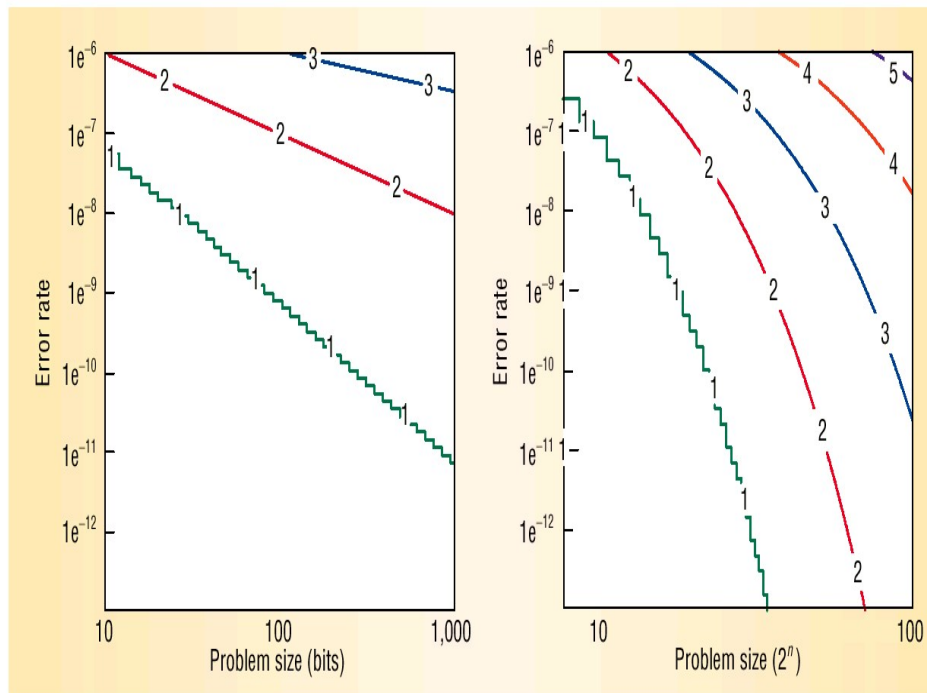


Oskin, ' A Practical Architecture for Reliable Quantum Computers'. IEEE Computer 35, Vol. 1,79(2002)  
Citar “quantum programming languages” quant-ph

# Ordenador Cuántico de Propósito General: Sobrecarga por Errores

**Table 1. Recursive error-correction overhead for a single-qubit operation using [7,1] Steane correction code.**

Recursion level ( $k$ )	Storage overhead $7^k$	Operation overhead $153^k$	Minimum time overhead $5^k$
0	1	1	1
1	7	153	5
2	49	23,409	25
3	343	3,581,577	125
4	2,401	547,981,281	625
5	16,807	83,841,135,993	3,125

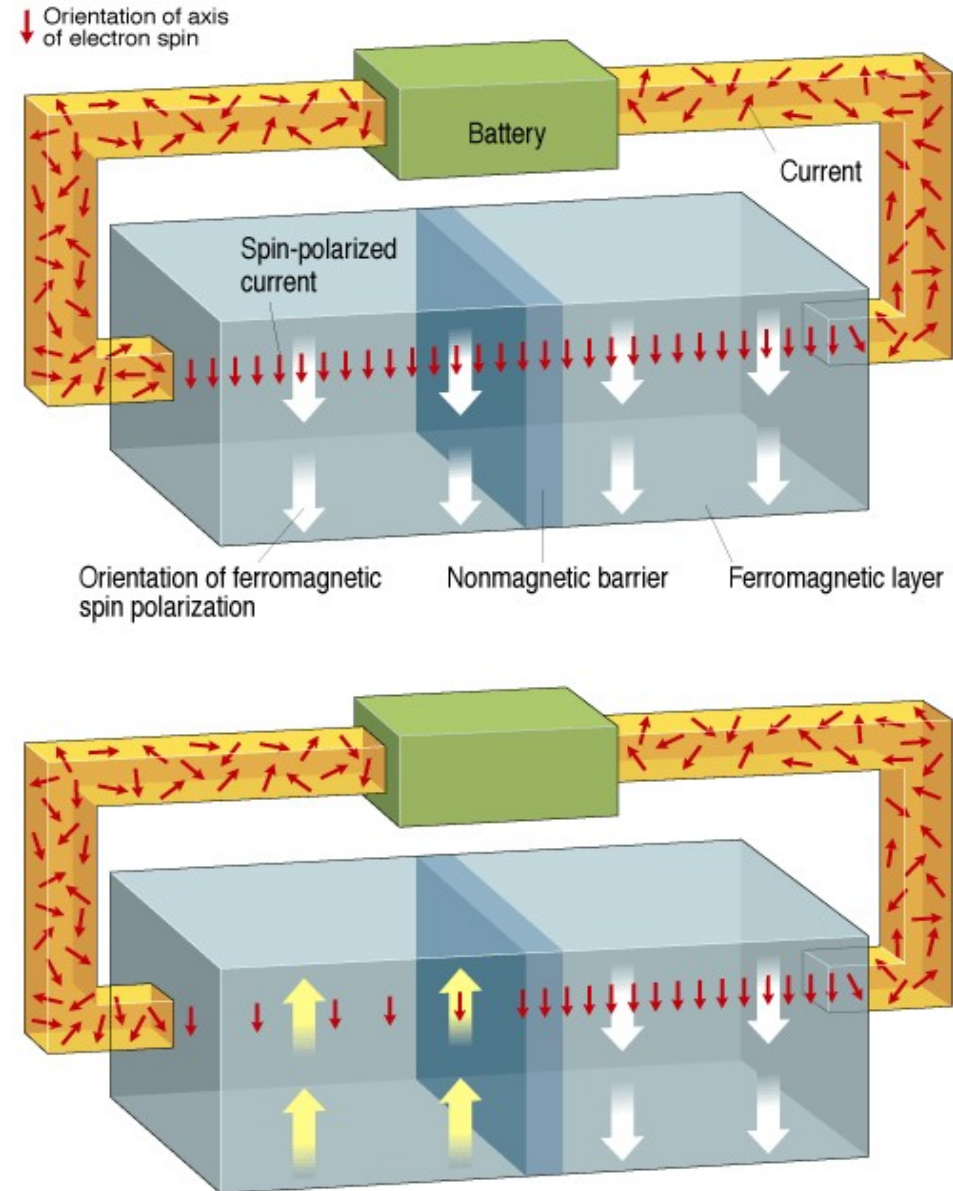


**Figure 1. Recursion level  $k$  with a varied problem size and underlying qubit error probability for Shor's quantum factorization algorithm (left) and Grover's quantum search algorithm (right).**



# Nuevas Tecnologías Asociadas.

- Spintronics: Electrónica con control del espín del electrón. Uso bien como espín+carga o sólo espín.
  - Mayor velocidad de funcionamiento, menor consumo, mayores niveles de integración...
  - Ya en sistemas de almacenamiento: cabezas de lectura... pronto en memorias. Wolf, 'Spintronics: A Spin-Based Electronic Vision for the Future', Science 294,1488(2001)
  - Pruebas de concepto de manipulación de espines en semiconductores usando señales eléctricas Kato, 'Gigahertz Electron Spin Manipulation Using Voltage-Controlled g-Tensor Modulation'. Science 299,1201(2003)

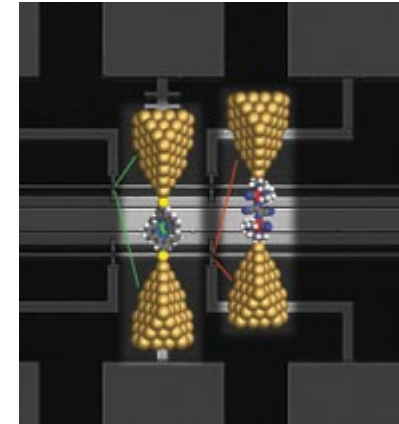


Spin transistor: IEEE Spectrum

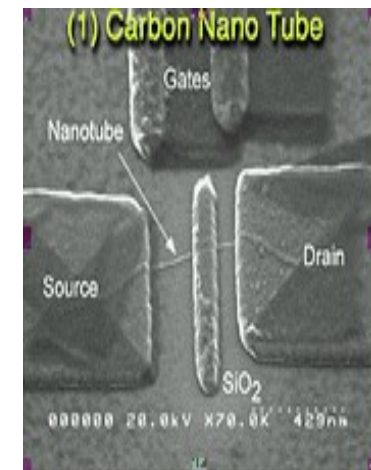
# Otras Tecnologías Asociadas: Nanotecnologías

- Bajo la denominación de nanotecnología se agrupan campos de lo más diverso. Algunos de los dispositivos mencionados están dentro de este campo... pero hay muchas propuestas: Computación Cuántica usando nanotubos de carbón, transistores de un sólo electrón, etc.

Un transistor con una sola molécula.  
Portada de Nature 417, 13 jun. 2002



Liang, 'Kondo Resonance in a Single-Molecule Transistor', Nature 417,722(2002)

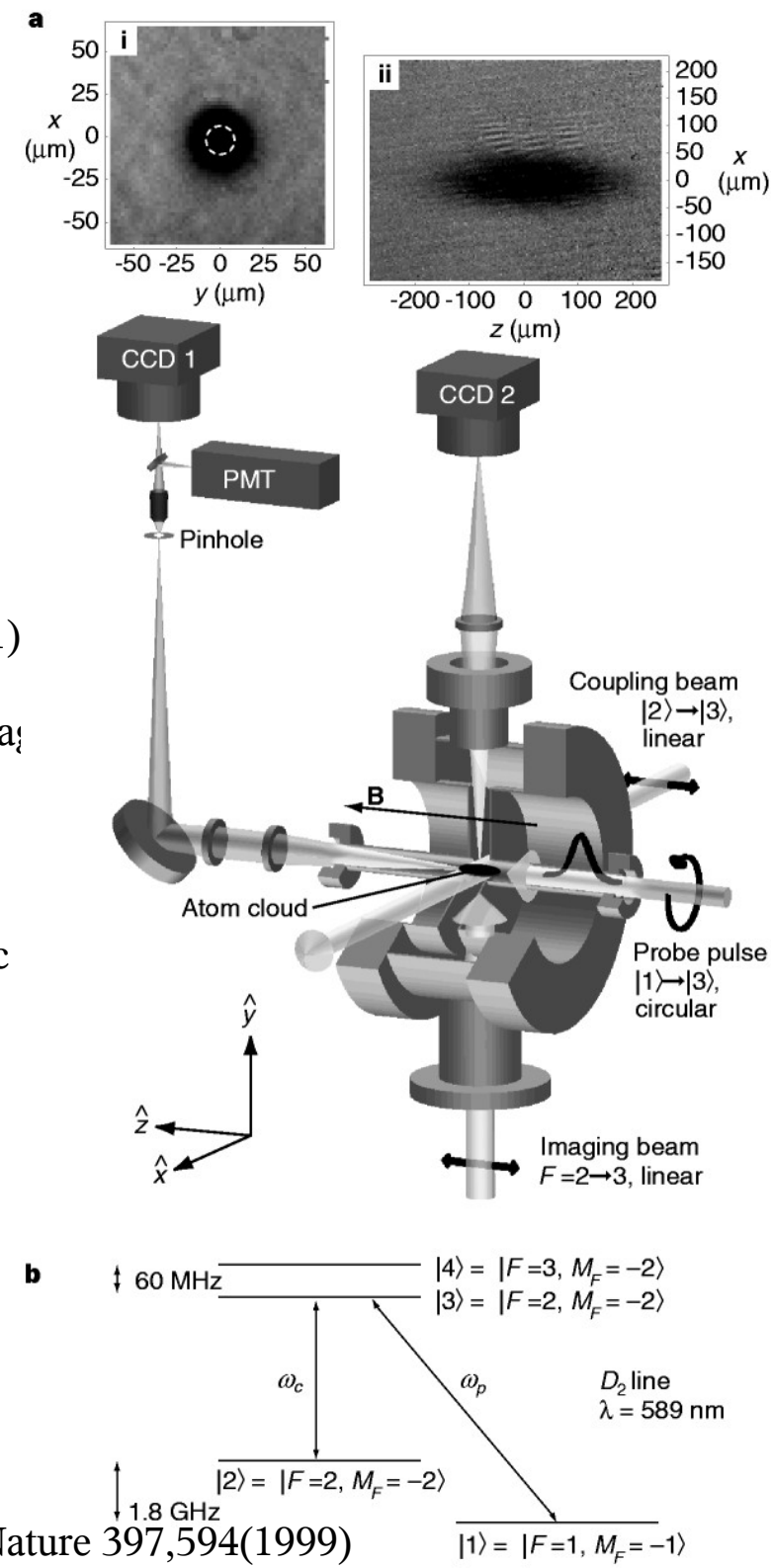


Microfotografía de un nanotubo integrado en un circuito electrónico(Frontier Research Institute, Japón)

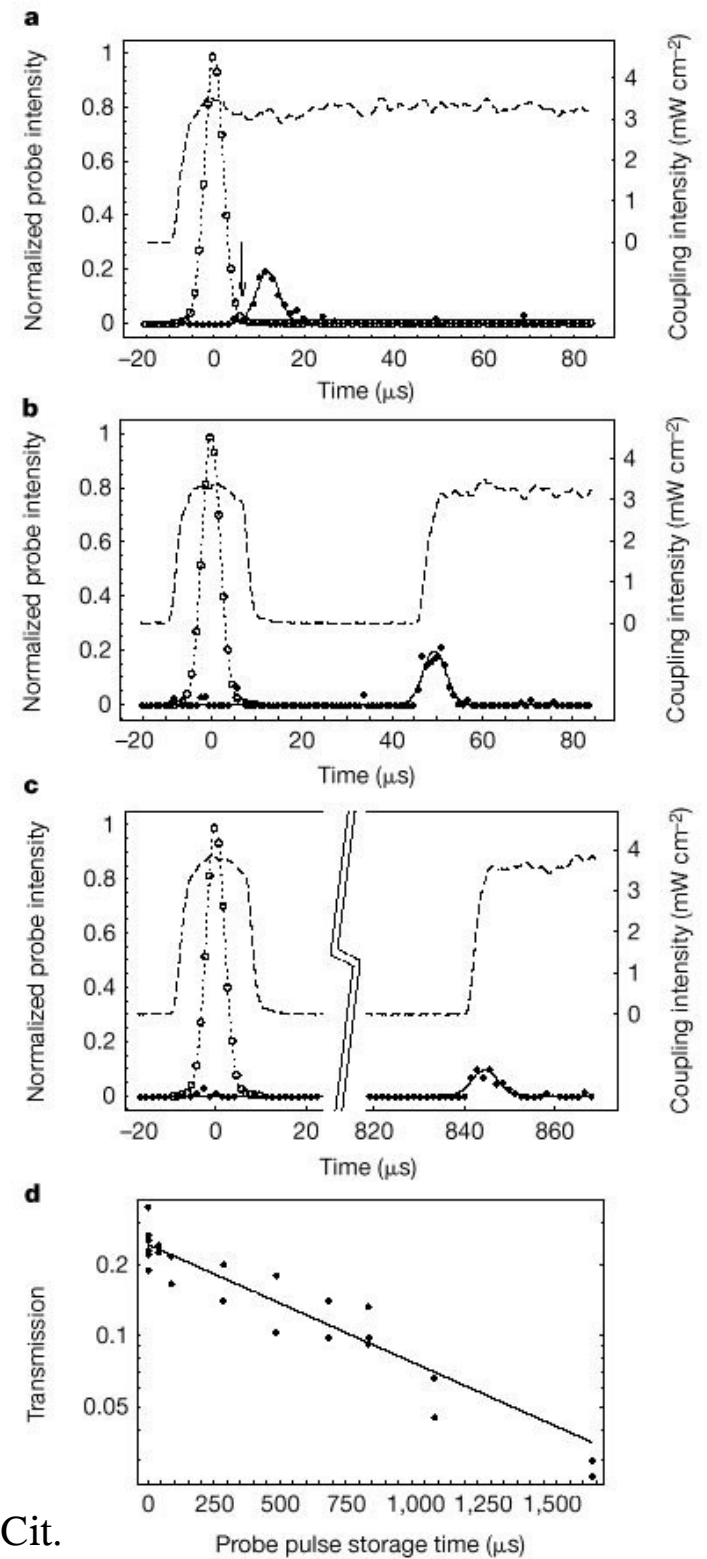
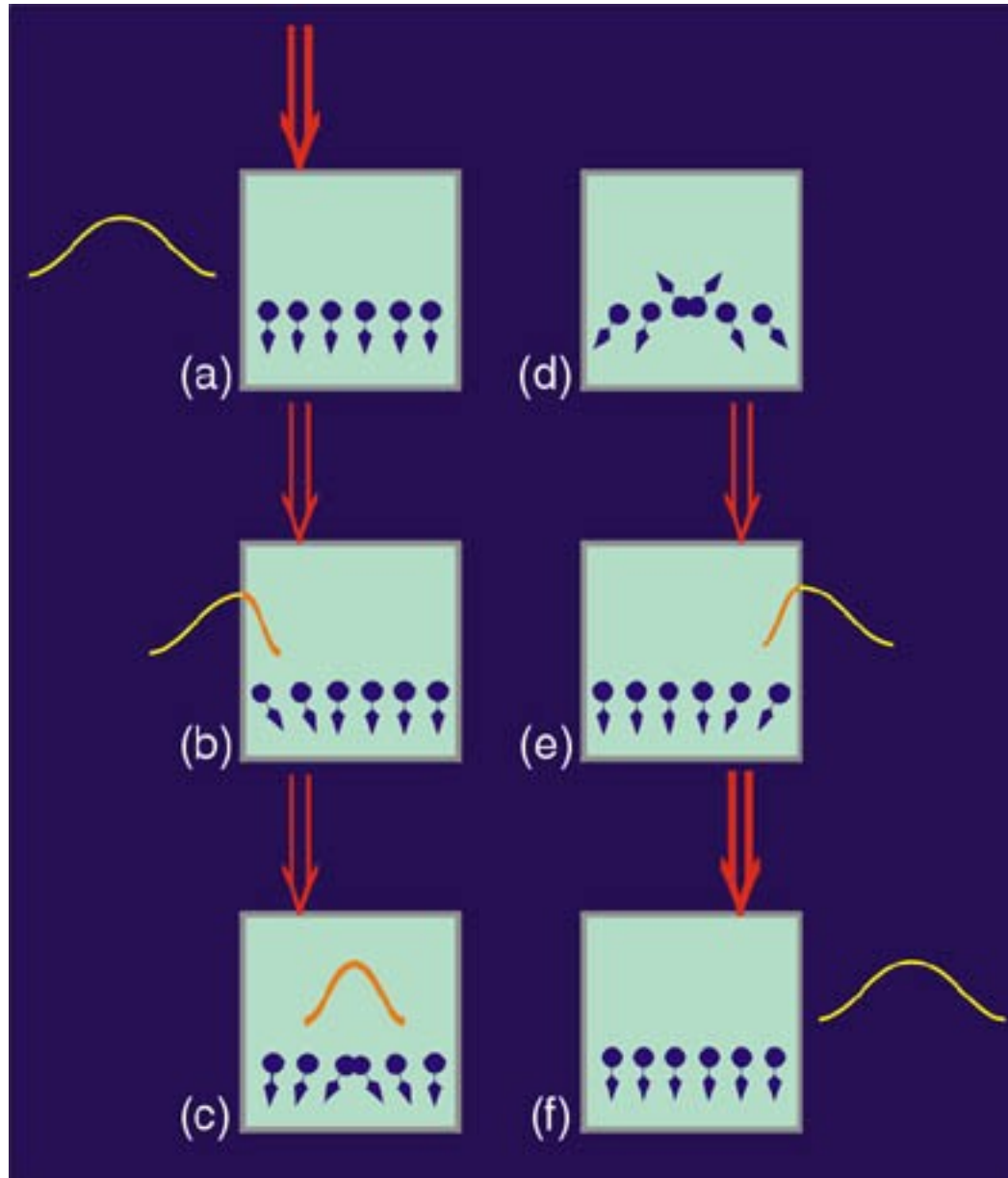


# Nuevas Tecnologías: Luz a Velocidad cero

- EIT: Si se puede parar un fotón y luego volverlo a mandar... ¿qué es esto sino almacenamiento?
  - Primero en una nube de átomos enfriados  
Liu, 'Observation of Coherent Optical Information Storage in an Atomic Medium Using Halted Light Pulses' Nature 409,490(2001)
  - Luego en gas a temperatura ambiente Phillips, 'Storage of Light in an Atomic Vapor', Phys. Rev. Lett. 86,783(2001)
  - ...y ahora en estado sólido.
  - ¡Y manteniendo la coherencia! Van der Wal, "Atomic Memory for Correlated Photon States". Science 10.1126/1085946 (May 2003)
- ... y de paso también se le puede aplicar alguna puerta Mair, 'Phase Coherence and Control of Stored Photonic Information' quant-ph/0108046



# Nuevas Tecnologías: Luz a Velocidad Cero



Phillips, Op. Cit.

# Tecnología y Fundamentos.

- En mecánica cuántica la medición de dos observables A y B tiene una incertidumbre asociada dada por su conmutador:

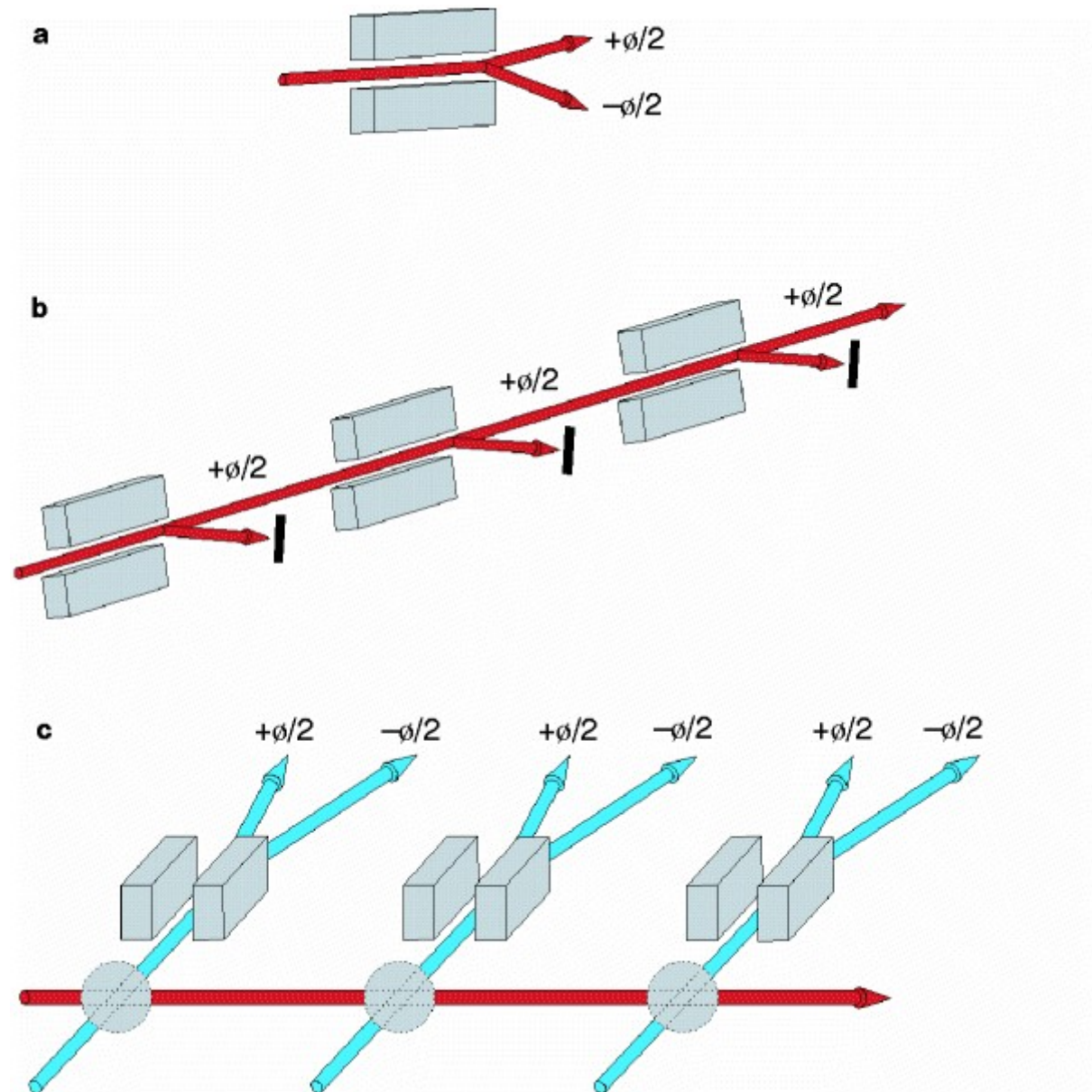
$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} \|AB - BA\|$$

- Este es el principio de incertidumbre de Heisenberg... que no nos impide medir A con toda la precisión que queramos si no nos importa B.

# Tecnología y Fundamentos

- Pero en la práctica, indeterminar demasiado uno de los operadores acaba perturbando al otro, de manera que mediciones repetidas no son posibles.
- Elegir estrategias de medida de modo que sea posible pasar ese 'ruido' a observables que no necesitemos para nada: Quantum Non Demolition
  - Unruh, 'Quantum Nondemolition and Gravity-Wave Detection', Phys. Rev. B 19,2888(1979)

# Tecnología y Fundamentos



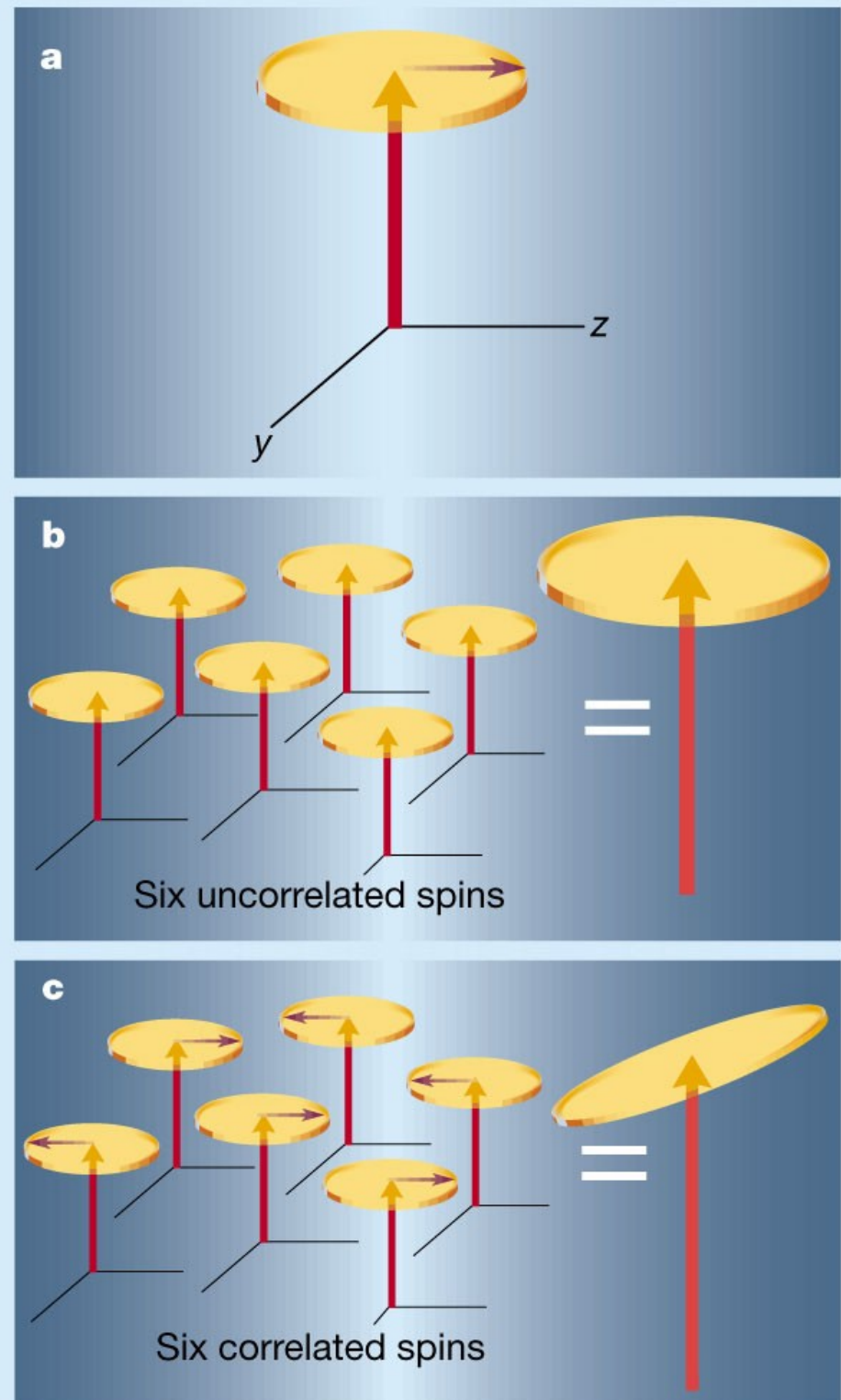
Grangier, ' Quantum Non-Demolition Measurements in Optics', Nature 396,537(1998)

# Tecnología y fundamentos.

- Si se prepara un estado de modo que la indeterminación en una de las variables es menor que en su conjugada se tiene un estado 'estirado' (squeezed).
  - QND y Squeezed states no sólo son importantes en computación e información cuántica (ej: criptografía). También lo es en estándares de metrología.

Orzel, 'Squeezed States in a Bose-Einstein Condensate' Science 291, 2386(2001)

Sorensen, 'Many Particle Entanglement with Bose-Einstein Condensates' Nature 409,63(2001)



# Criptografía Cuántica

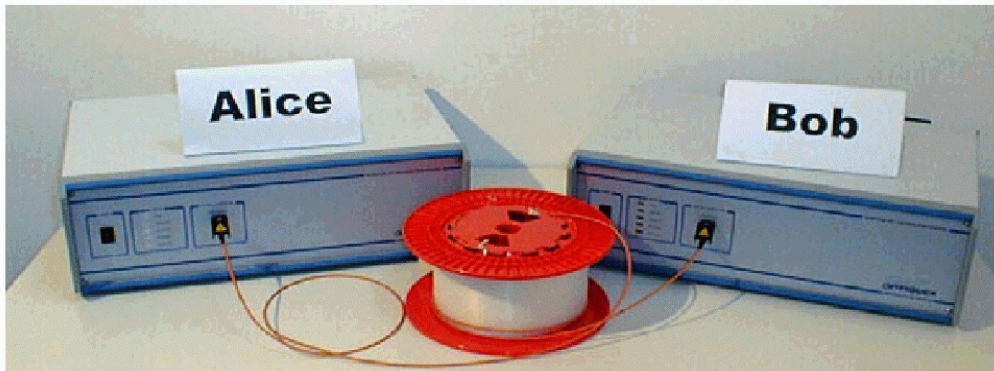
- Distribución de claves con seguridad absoluta
  - ... en realidad con un umbral de seguridad tan bueno como fijemos a priori.
    - Basados en envío/recepción de fotones individuales
      - Protocolo BB84
    - Basados en compartir pares EPR
      - Protocolo B92
    - ... pero ambos son equivalentes. Y hay variantes de estos esquemas.
    - Otros protocolos, uso de qu-dits (qubits en espacio de Hilbert  $d$ -dimensional), variables continuas.
      - Cerf, 'Security of Quantum Key Distribution Using  $d$ -Level Systems', Phys. Rev. Lett. 88, 127902 (2002)

# Criptografía Cuántica: Dispositivos

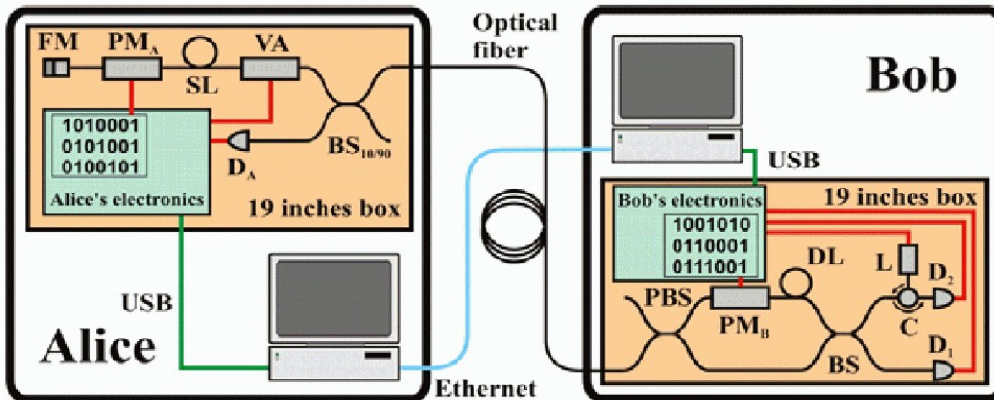
- Es la parte de QI más avanzada: Ya existen dispositivos comerciales para distribución de claves (BB84).
  - Para fibra óptica convencional pero punto a punto (línea continua)
  - En transmisión al aire libre (casi comercial)
    - Ambos usan pulsos laser atenuados (en promedio contienen menos de un fotón) → Problemas de seguridad.
    - Existen experimentos con dispositivos de fotón único y variables continuas.



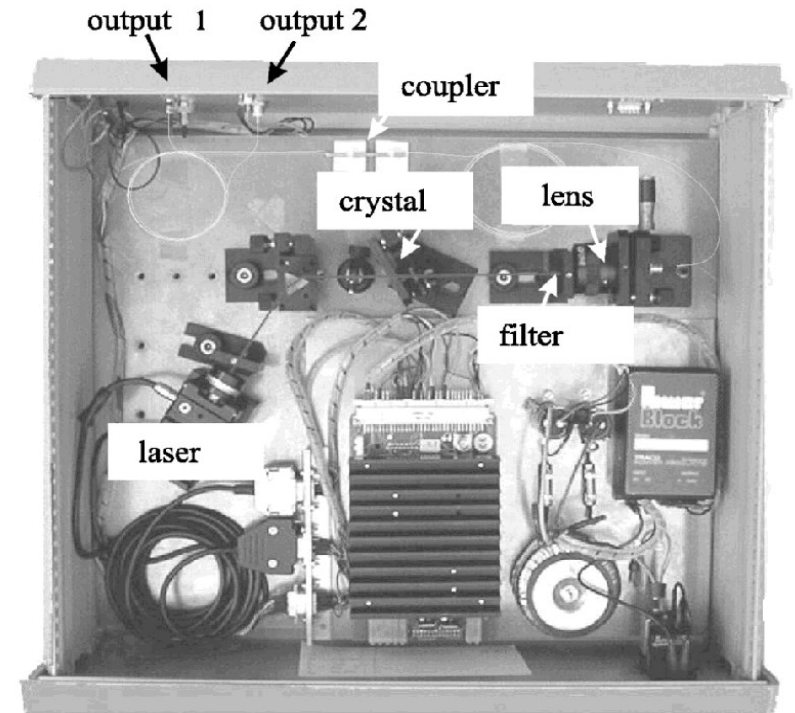
# Criptografía Cuántica: Dispositivos



**Figure 1.** Picture of the p&p system.



**Figure 2.** Schematic of the p&p prototype.



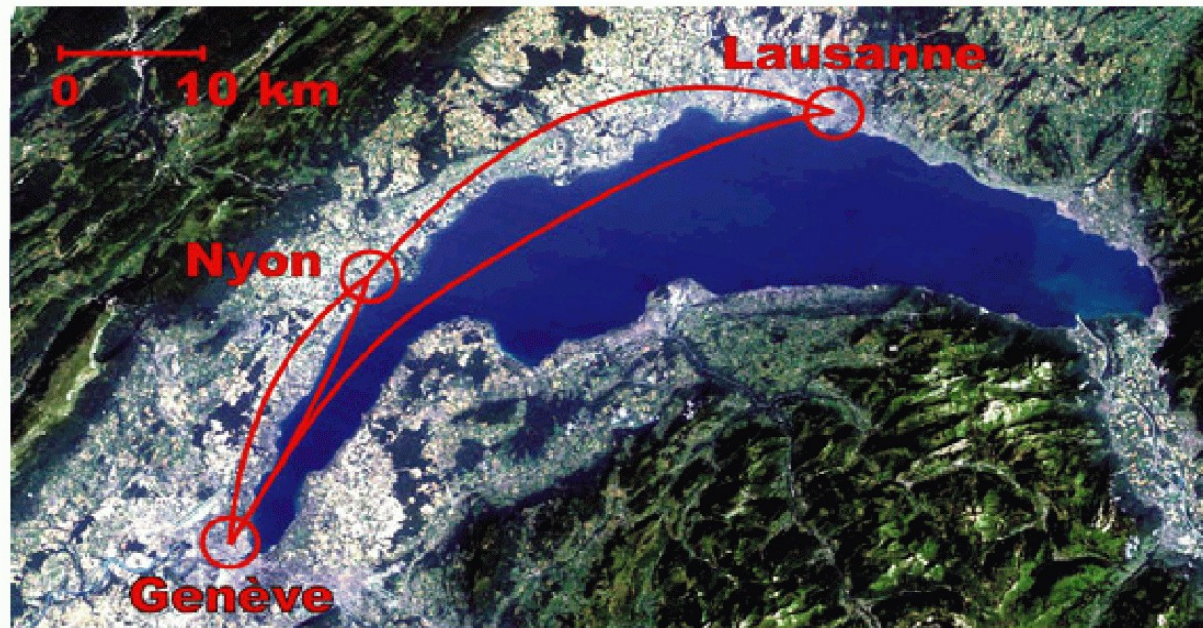
**FIG. 5.** Photo of our entangled photon-pair source as used in the first long-distance test of Bell's inequalities (Tittel *et al.*, 1998). Note that the whole source fits into a box only  $40 \times 45 \times 15 \text{ cm}^3$  in size and that neither a special power supply nor water cooling is necessary.

Gisin, "Quantum Cryptography".  
Rev. Mod. Phys. 74, 145 (2000)

Stucki, "Quantum Key Distribution Over 67Km With a p&p System"  
New J. Phys. 4, 41 (2002)

A la venta: [www.idquantique.com](http://www.idquantique.com)

# Criptografía Cuántica: Rendimiento



Stucki, op. Cit.

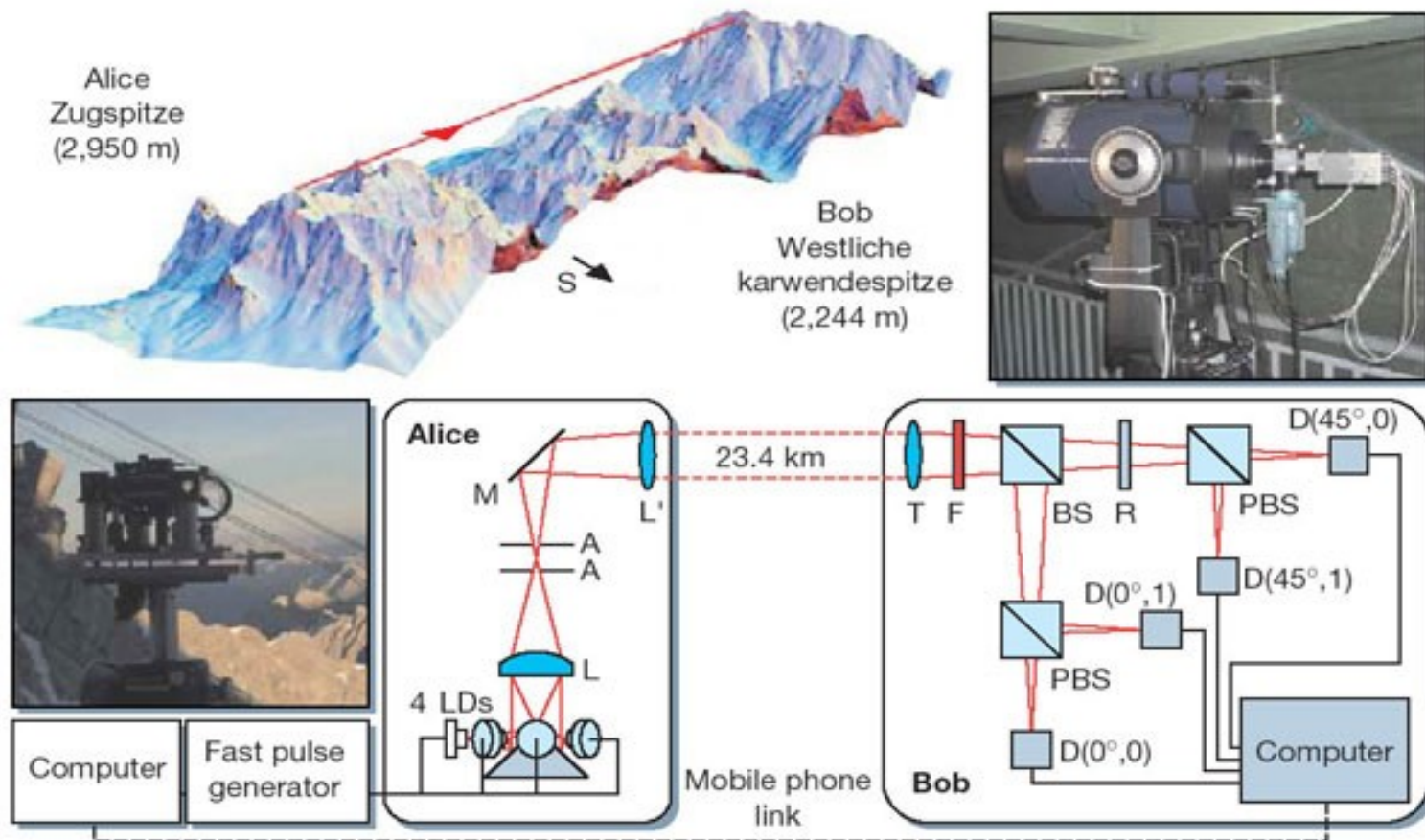
**Table 2.** Overview of exchanged keys over different fibres ( $\mu = 0.2$ ).

Fibre	Length (km)	Key (kbit)	$R_{raw}$ (kHz)	$QBER$ (%)	$R_{net}$ (kHz)
Geneva–Nyon (under lake)	22.0	27.9	2.06	$2.0 \pm 0.1$	1.51
Geneva–Nyon (terrestrial)	22.6	27.5	2.02	$2.1 \pm 0.1$	1.39
Nyon–Lausanne (terrestrial)	37.8	25.1	0.50	$3.9 \pm 0.2$	0.26
Geneva–Lausanne (under lake) A	67.1	12.9	0.15	$6.1 \pm 0.4$	0.044
Geneva–Lausanne (under lake) B	67.1	12.9	0.16	$5.6 \pm 0.3$	0.051
Ste Croix (aerial) A	8.7	63.8	6.29	$3.0 \pm 0.1$	4.34
Ste Croix (aerial) B	23.7	117.6	2.32	$3.0 \pm 0.1$	1.57



# Criptografía Cuántica: Aire libre

- Posible esquema para globalizar la distribución de claves usando puntos “seguros” (satélites)



# Criptografía Cuántica: Pares EPR

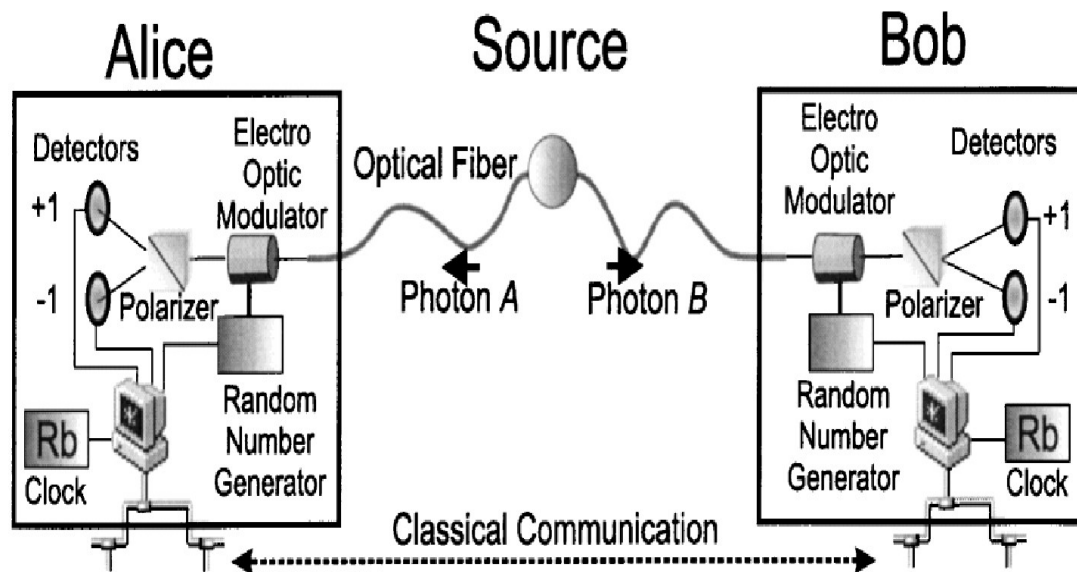


FIG. 2. The polarization entangled photons are transmitted via optical fibers to Alice and Bob, who are separated by 360 m, and both photons are analyzed, detected, and registered independently. After a measurement run the keys are established by Alice and Bob through classical communication over a standard computer network.

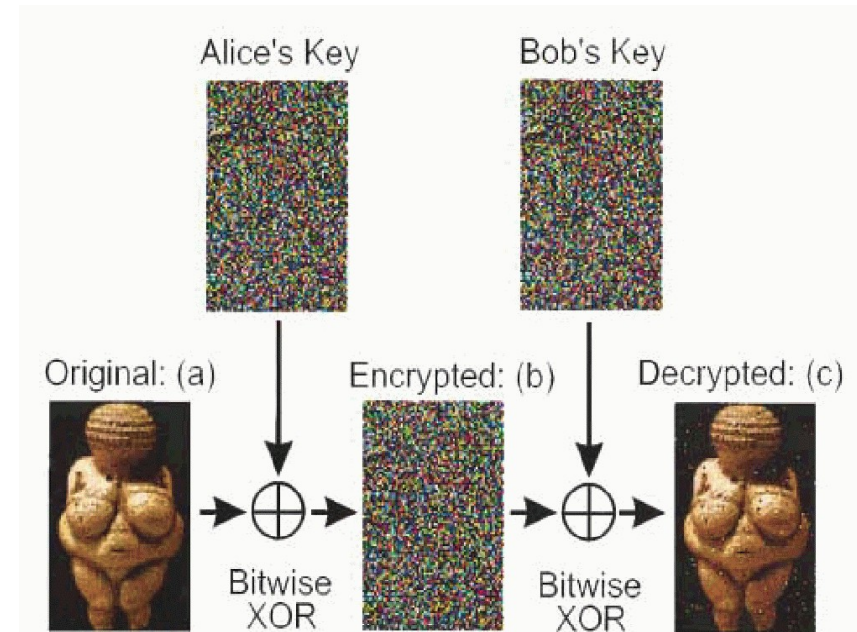
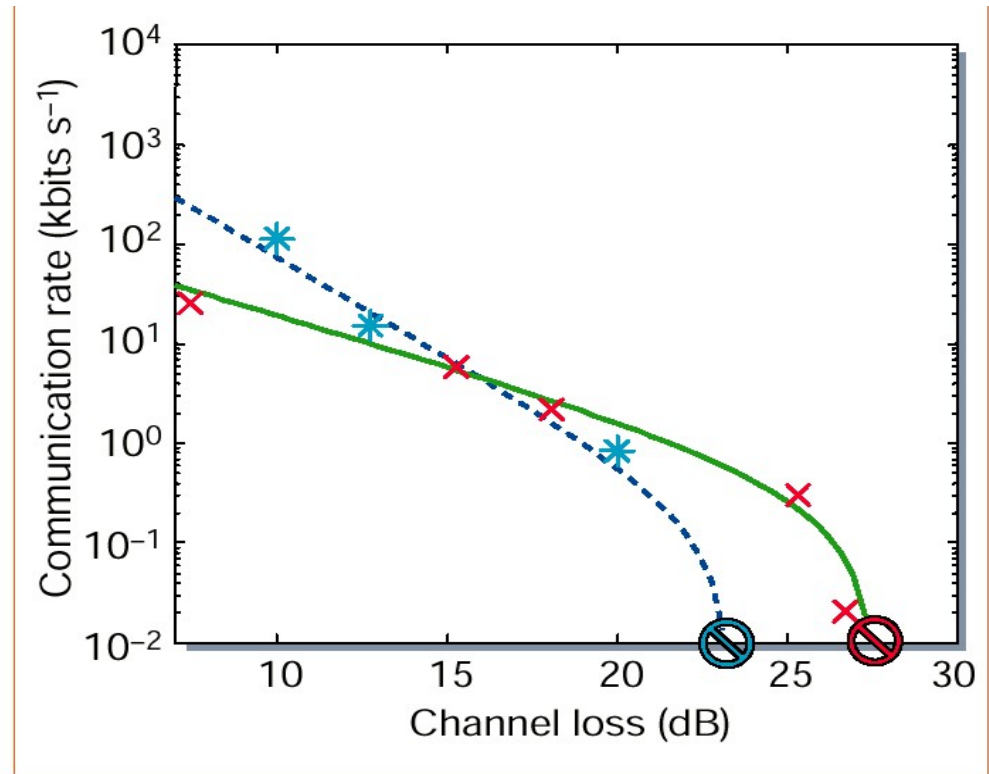
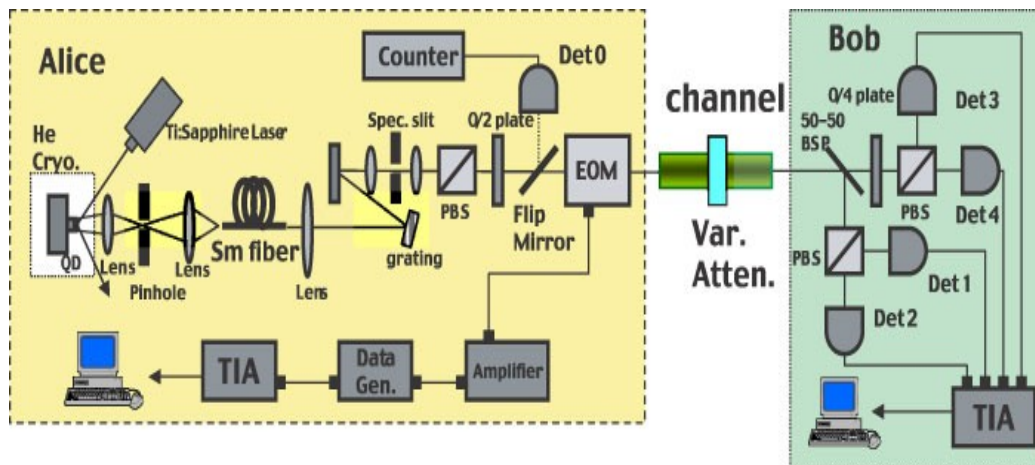


FIG. 3 (color). The 49984 bit large keys generated by the BB84 scheme are used to securely transmit an image [23] (a) of the “Venus von Willendorf” [24] effigy. Alice encrypts the image via bitwise XOR operation with her key and transmits the encrypted image (b) to Bob via the computer network. Bob decrypts the image with his key, resulting in (c) which shows only a few errors due to the remaining bit errors in the keys.

# Criptografía Cuántica: Fotón Único

- Mayor seguridad y resistencia al ruido.



**Figure 1** Comparison of the turnstile device with a standard laser. Measured (crosses, turnstile device; stars, laser) and simulated (full line, turnstile device; dashed line, laser) bit rates are shown as a function of total loss from the channel and detection system. Circles: blue, the attenuation at which our system was experimentally shown to reject the entire key using an attenuated laser (23 decibels); red, point at which our system rejected the entire key for the turnstile device (28 decibels). This shows a 5-decibel improvement in the loss cut-off.

Usando una estructura con un punto cuántico (photon turnstile): Waks, 'Quantum cryptography with a photon turnstile'. Nature 420, 762 (2002) (en las figuras)

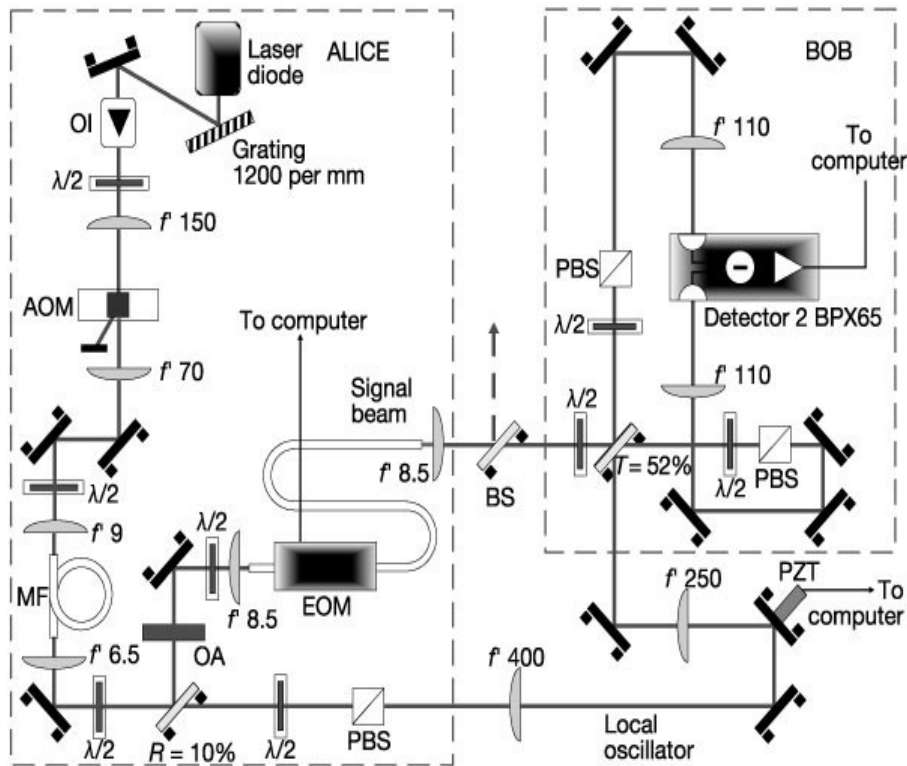
Usando un centro de color: Beveratos, 'Single Photon Quantum Cryptography'. Phys. Rev. Lett. 89, 187901 (2002)

# Criptografía Cuántica: Variables Continuas

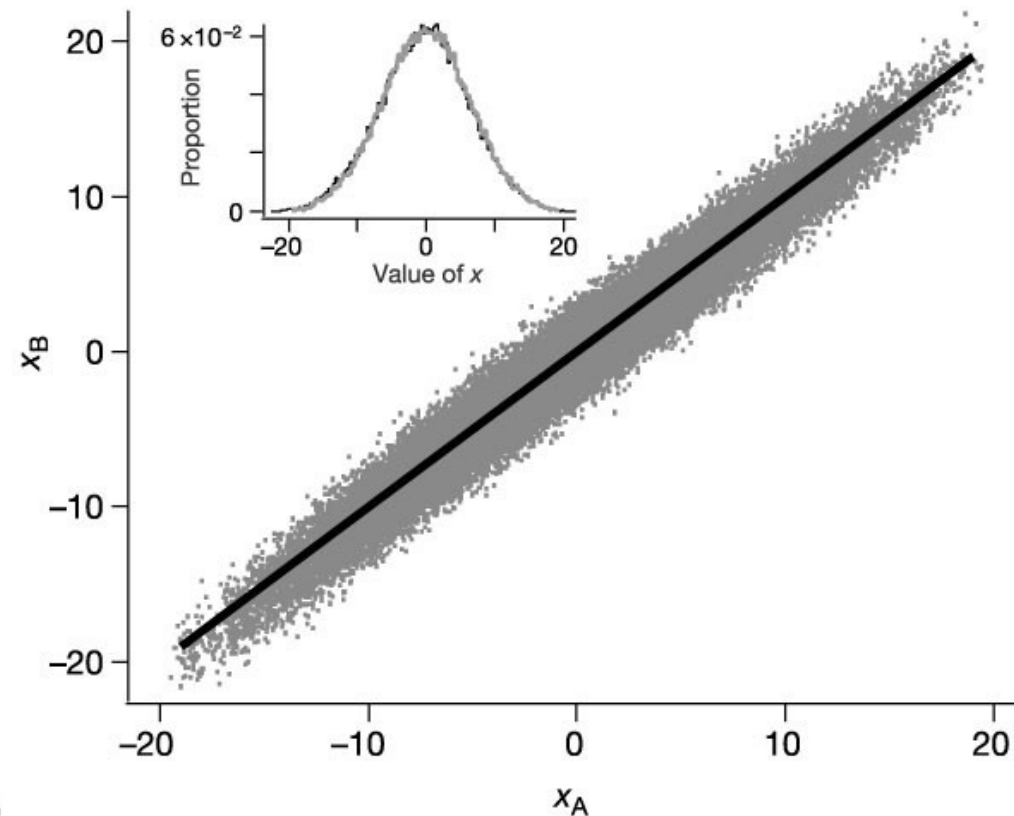
- Aumento del ancho de banda y de la distancia máxima.
  - El emisor genera dos números aleatorios de distribución gaussiana y media cero:  $(x,p)$
  - Envía al receptor el estado  $|x+ip\rangle$  El receptor elige medir bien  $x$  o bien  $p$  de manera aleatoria, informando después al emisor de que variable eligió medir.
  - Al cabo de una serie de intercambios, emisor y receptor comparten un conjunto de valores que están correlacionados clásicamente a partir de los cuales se puede destilar una clave.



# Criptografía Cuántica: Variables Continuas



**Figure 1** Experimental set-up. Laser diode, SDL 5412 (780 nm); OI, optical isolator;  $\lambda/2$ , half-wave plate; AOM, acousto-optic modulator; MF, polarization maintaining single-mode fibre; OA, optical attenuator; EOM, electro-optic amplitude modulator; PBS, polarizer; BS, beam splitter; PZT, piezoelectric transducer. Focal lengths ( $f'$ ) are given in millimetres.  $R$  and  $T$  are reflection and transmission coefficients.



Arriba: Correlación entre las variables  $x$  que envía Alice  $x_A$  y las que obtiene Bob,  $x_B$

Grosshans, 'Quantum Key Distribution Using Gaussian Modulated Coherent States'. Nature 421, 238 (2003)

Experimento: 1.7 Mbits/s en línea sin pérdidas y 75 kbits/s en línea con 3.1dB. Comparar (aprox.) con Ste. Croix A en Stucki (op. Cit.)

# Technology Roadmap

























































Ver <http://qist.lanl.gov>




- **Los 5 + 2 requisitos de DiVincenzo** DiVincenzo, 'The Physical Implementation of Quantum Computation', arXiv:quant-ph/0002077 (2000)
- **Computación**
  - #1 Sistema escalable con qubits bien caracterizados.
  - #2 Capacidad de inicialización en un estado bien determinado.
  - #3 Tiempos de decoherencia mucho mayores que tiempos de manipulación.
  - #4 Disponer de un conjunto universal de puertas.
  - #5 Capacidad de lectura de qubits.
- **Información**
  - #6 Conversión de qubits de 'transmisión' a qubits de 'proceso' (estacionarios).
  - #7 Capacidad de transmisión fiable de qubits.



# Technology Roadmap vs. DiVincenzo Criteria

**Table 4.0-1**  
**The Mid-Level Quantum Computation Roadmap: Promise Criteria**

QC Approach	The DiVincenzo Criteria							
	Quantum Computation						QC Networkability	
	#1	#2	#3	#4	#5		#6	#7
NMR								
Trapped Ion								
Neutral Atom								
Optical								
Solid State								
Superconducting								
Unique Qubits								
e-Helium								
Spectral Hole Burning								

Legend:  = a potentially viable approach has achieved sufficient proof of principle  
 = a potentially viable approach has been proposed, but there has not been sufficient proof of principle  
 = no viable approach is known

# Technology Roadmap: Status Metrics

To represent the present status of each approach the panel developed a set of metrics that represent relevant steps on the way to the five- and ten-year goals. The panel decided to use a similar color coding to indicate the status of each approach (Table 4.0-2). The “development status metrics” are as follows:

## 1. Creation of a qubit

1.1 Demonstrate preparation and readout of both qubit states.

## 2. Single-qubit operations

2.1 Demonstrate Rabi flops of a qubit.

2.2 Demonstrate decoherence times much longer than Rabi oscillation period.

2.3 Demonstrate control of both degrees of freedom on the Bloch sphere.

## 3. Two-qubit operations

3.1 Implement coherent two-qubit quantum logic operations.

3.2 Produce and characterize the Bell entangled states.

3.3 Demonstrate decoherence times much longer than two-qubit gate times.

## 4. Operations on 3–10 physical qubits

4.1 Produce a Greenberger, Horne, and Zeilinger (GHZ) entangled state of three qubits.

4.2 Produce maximally-entangled states of four and more physical qubits.

4.3 Quantum state and process tomography.

4.4 Demonstrate decoherence-free subspaces (DFSs).

4.5 Demonstrate the transfer of quantum information (*e.g.*, teleportation, entanglement swapping, multiple SWAP operations etc.) between physical qubits.

4.6 Demonstrate quantum error-correcting codes.

4.7 Demonstrate simple quantum algorithms (*e.g.*, Deutsch-Josza).

4.8 Demonstrate quantum logic operations with fault-tolerant precision.

## 5. Operations on one logical qubit

5.1 Create a single logical qubit and “keep it alive” using repetitive error correction.

5.2 Demonstrate fault-tolerant quantum control of a single logical qubit.

## 6. Operations on two logical qubits

6.1 Implement two-logical-qubit operations.

6.2 Produce two-logical-qubit Bell states.

6.3 Demonstrate fault-tolerant two-logical-qubit operations.

## 7. Operations on 3–10 logical qubits

7.1 Produce a GHZ-state of three logical qubits.

7.2 Produce maximally-entangled states of four and more logical qubits.

7.3 Demonstrate the transfer of quantum information between logical qubits.

7.4 Demonstrate simple quantum algorithms (*e.g.*, Deutsch-Josza) with logical qubits.

7.5 Demonstrate fault-tolerant implementation of simple quantum algorithms with logical qubits.

The development status metrics 1 through 4 correspond to steps on the way to achieving the high level goals for 2007, while development status metrics 5 through 7 correspond to steps leading up to the high-level goal for 2012. For each QC approach the TEP members have assigned a status code for each of these metrics. These codes will be updated in future versions of the roadmap to reflected significant developments within each approach.

# Technology Roadmap.

<http://qist.lanl.gov>

Table 4.0-2  
The Mid-Level QC Roadmap—Development Status Metrics

QC Approach	1	1.1	2	2.1	2.2	2.3	3	3.1	3.2	3.3	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8
NMR																			
Trapped Ion																			
Neutral Atom																			
Optical																			
Solid State																			
Gated qubits																			
Optically measured QD qubits																			
Doped or “Spin” qubits																			
Superconducting																			
QC Approach	5	5.1	5.2	6	6.1	6.2	6.3	7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5						
NMR																			
Trapped Ion																			
Neutral Atom																			
Optical																			
Solid State																			
Gated qubits																			
Optically measured QD qubits																			
Doped or “Spin” qubits																			
Superconducting																			

Legend: = sufficient experimental demonstration  
 = preliminary experimental demonstration, but further experimental work is required  
 = no experimental demonstration

# Bibliografía Adicional

- Hornak, 'NMR Basics', <http://www.cis.rit.edu/htbooks/nmr/bnmr.htm>
- Bloch, 'Nuclear Induction', Phys. Rev. 70,460(1946)
- Nielsen, Chuang, 'Quantum Computation and Quantum Information', Cambridge University Press, 2000.
- D. Kielpinski, 'Entanglement and Decoherence in a Trapped-Ion Quantum Register'. Tesis Doctoral, U. Colorado, 2001
- Boyden, 'Quantum Computation: Theory and Implementation', Master Thesis, MIT 1999.
- Maguire, 'Towards a Tabletop Quantum Computer', Master Thesis, MIT 1999 (NMR)
- Gisin, 'Quantum Cryptography', Rev. Mod. Phys. 74,145(2002)
- Makhlin, 'Quantum-state Engineering with Josephson Junction Devices', Rev. Mod. Phys. 73,357(2002)
- Galindo, 'Information and Computation: Classical and Quantum Aspects', Rev. Mod. Phys. 74,347(2002)
- Quantum Information Science and Technology Experts Panel, 'A Quantum Information Science and Technology Roadmap', <http://qist.lanl.gov> version 1.0, Diciembre 2002