



# Implementations of Quantum Computers:

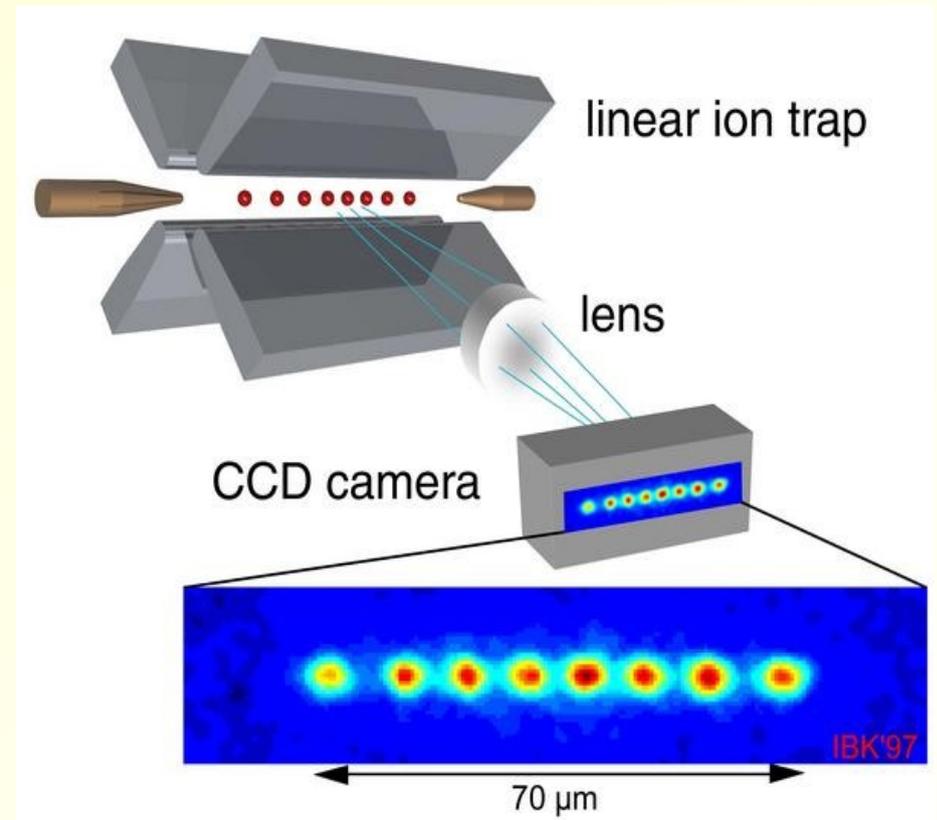


## Trapped ions

J. J. García-Ripoll  
Física Teórica I, Fac. CC. Físicas,  
UCM

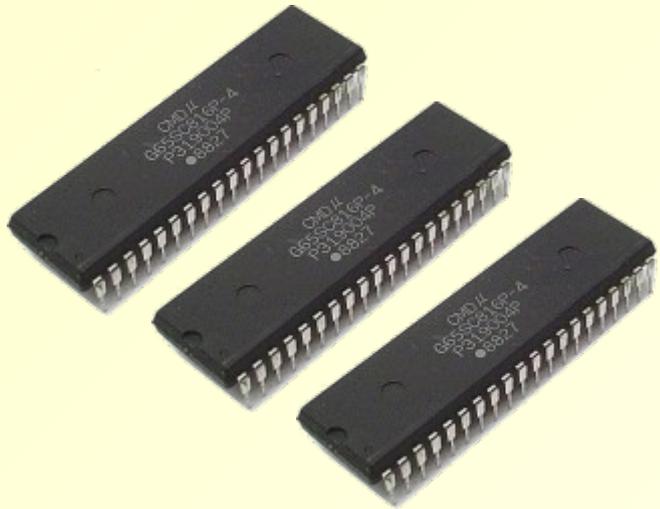
# Esquema general

- **Goles y dificultades**
- Diferentes candidatos
- Trampas de iones:
  - Confinamiento
  - Enfriamiento
  - Medida
  - Manipulación
- Ejemplo práctico:
  - Puerta de fase geométrica.



# Elementos clásicos

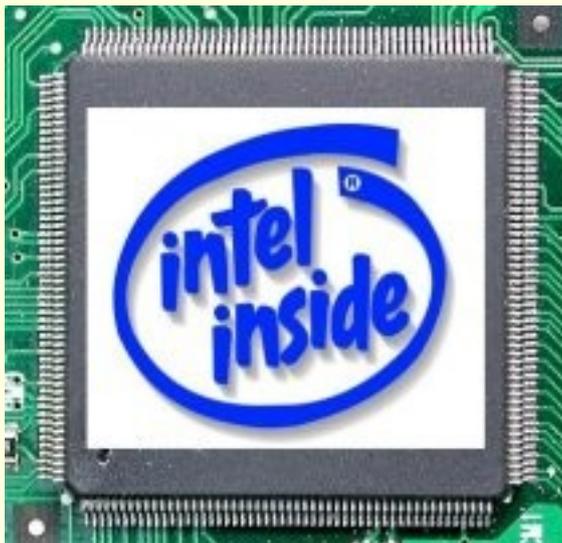
## Memorias volátiles:



## Memorias permanentes:



## Procesadores:



## Comunicación y redes:

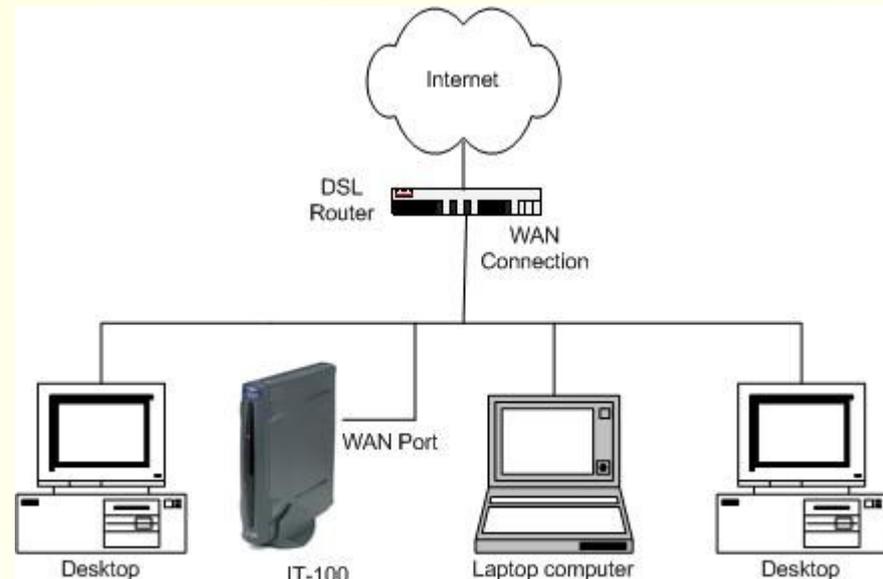
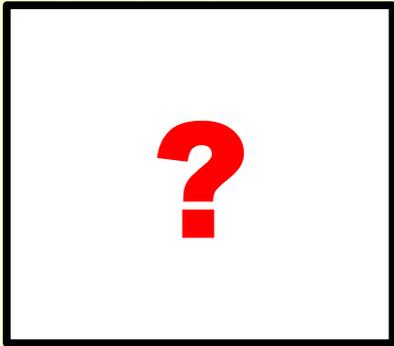


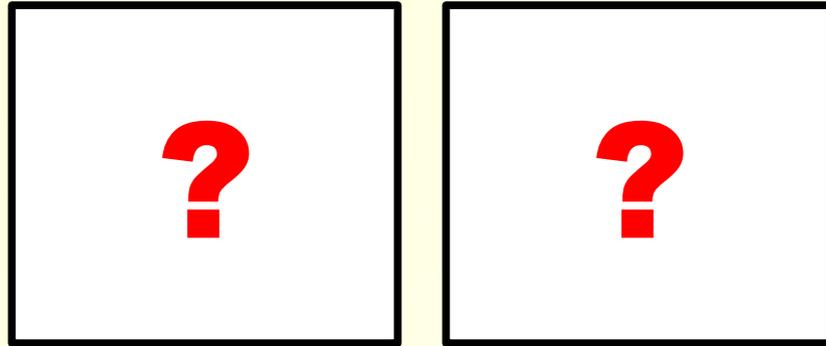
Diagram B

# Elementos cuánticos

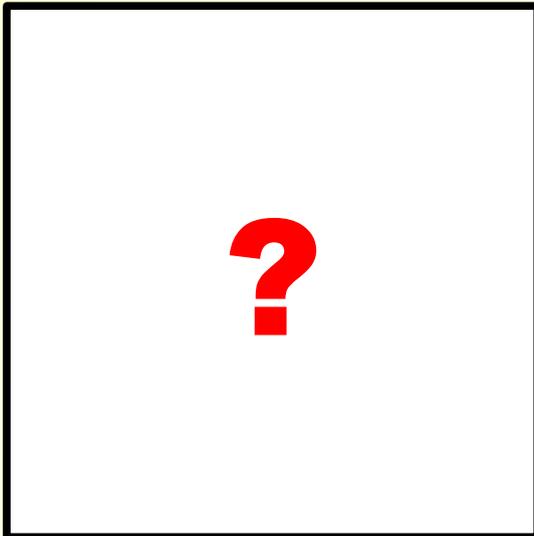
**Memorias volátiles:**



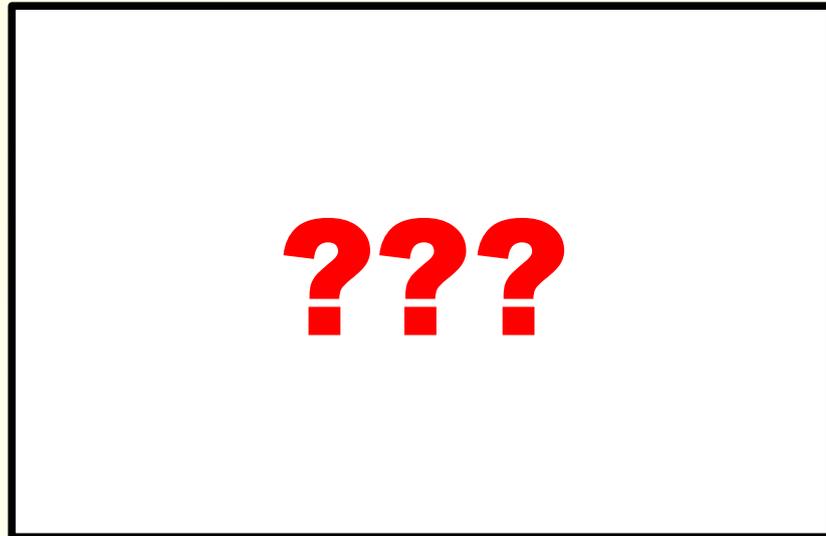
**Memorias permanentes:**



**Procesadores:**



**Comunicación y redes:**



# *“Quid pro quo”*

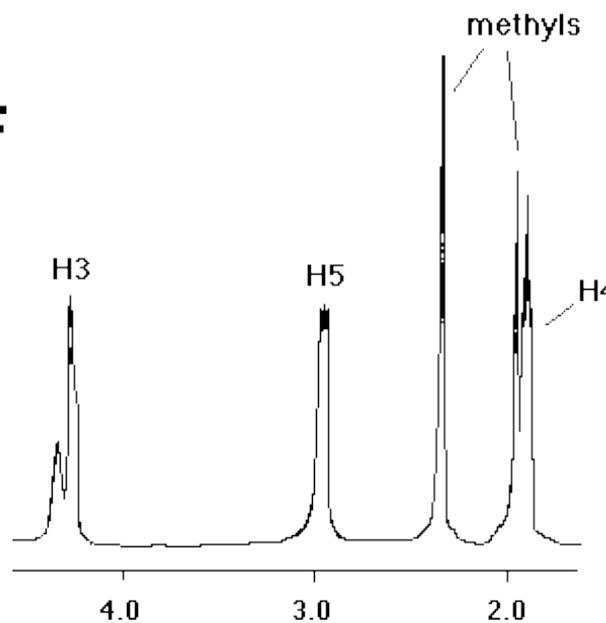
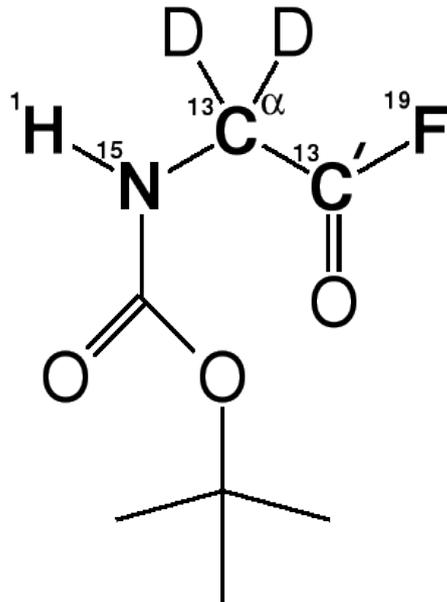
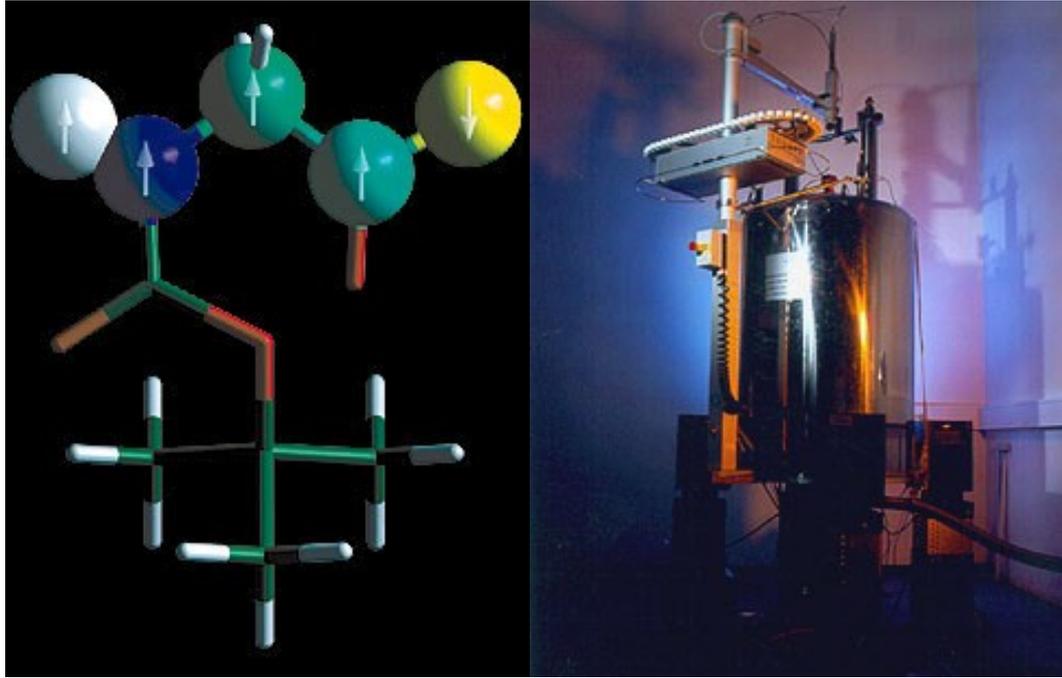
## **Deseamos:**

- Qubits
- Leer y escribir
- Puertas lógicas
- Estabilidad de la información.
- Transporte de la información cuántica

## **Dificultades:**

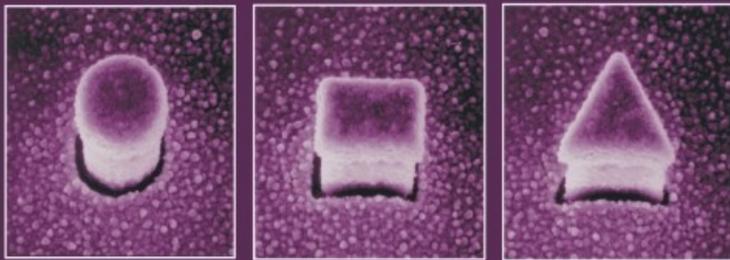
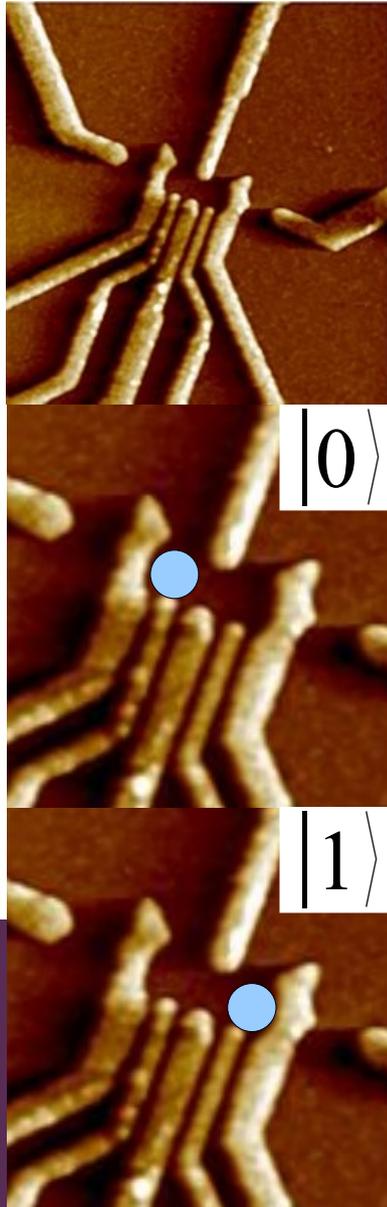
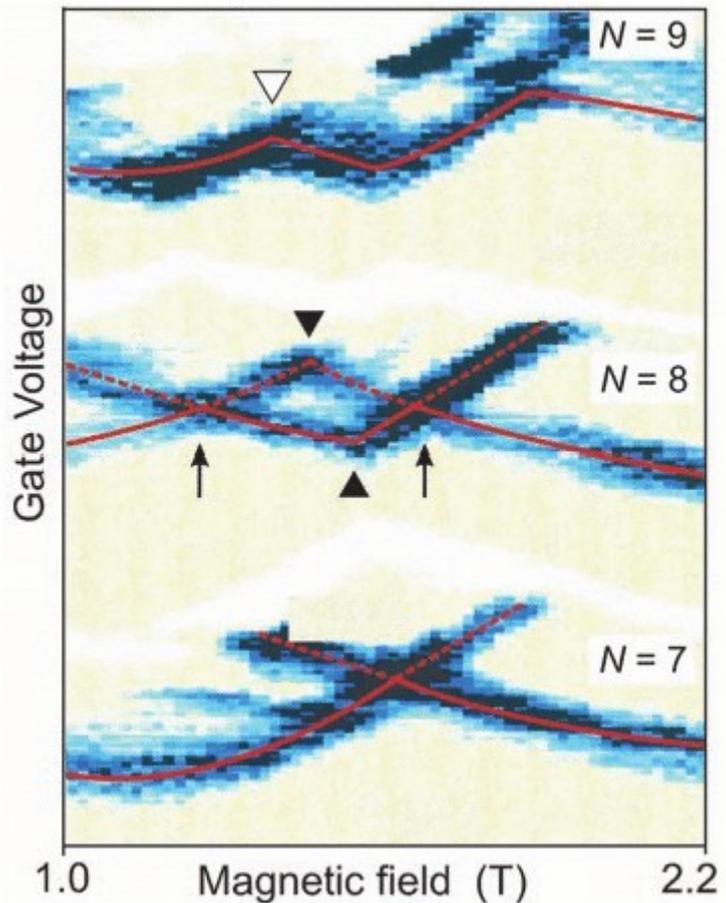
- Sistemas complejos a muchos cuerpos
- Nanotecnología
- Rapidez: fs, ps,...
- Interacción entre qbits
- Decoherencia
- Disipación
- Errores

# NMR



- Billones de moléculas en una disolución.
- Qubit = spin de uno o más núcleos en la molécula.
- Manipulación con radiofrecuencias y campos magnéticos.
- Spines interaccionan entre sí como pequeños imanes.
- Fuerte decoherencia.
- Sistemas pequeños.

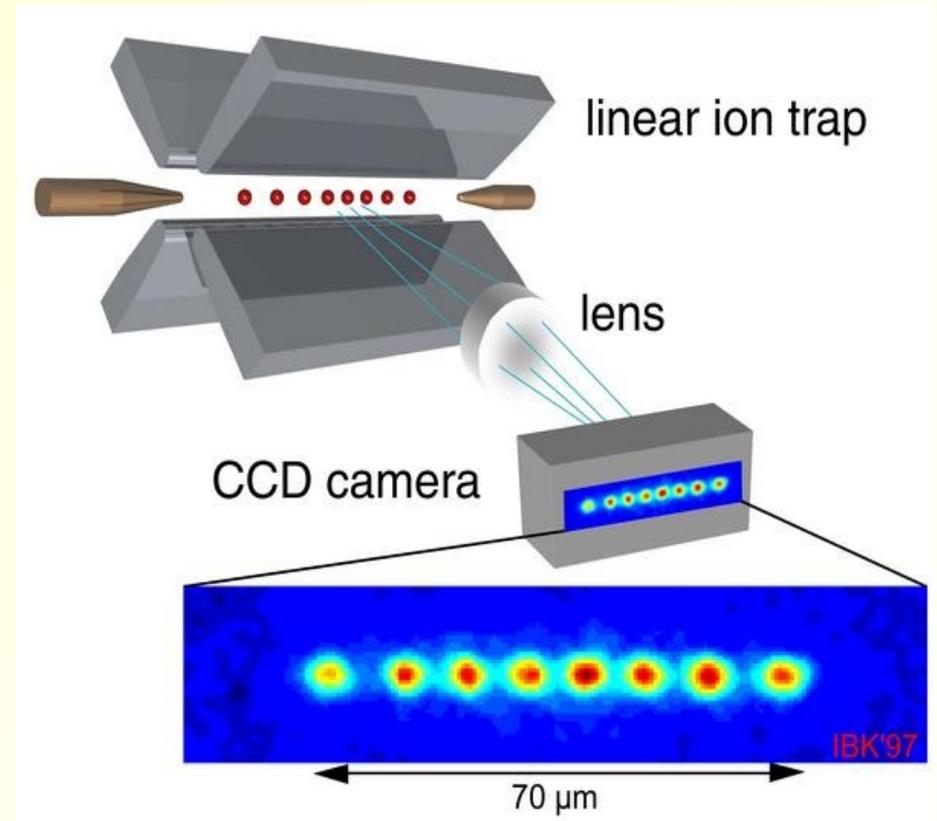
# “Quantum dots”



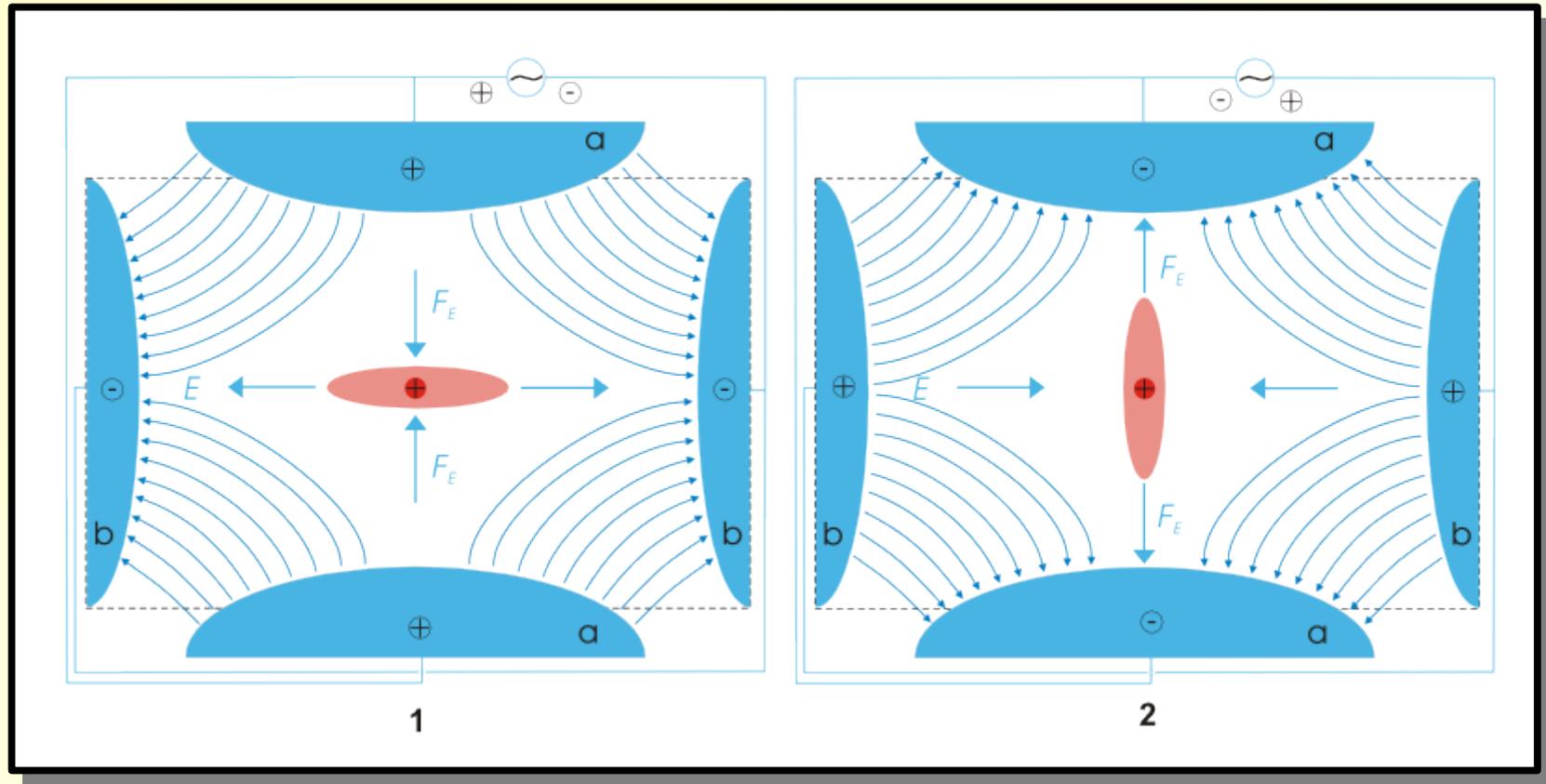
- Electrones confinados en nanoestructuras.
- Qubit = spin de un electrón, o # de electrones
- Manipulación con voltajes y campos magnéticos.
- Fuerte decoherencia (ms).
- Interacciones muy rápidas (ns).
- Difícil control.

# Trampas de iones

- **Confinamiento**
- Qubit
- Operaciones locales
- Medidas
- Sistemas de  $\geq 2$  iones
  - Interacción
  - Modos normales
  - Hamiltoniano efectivo

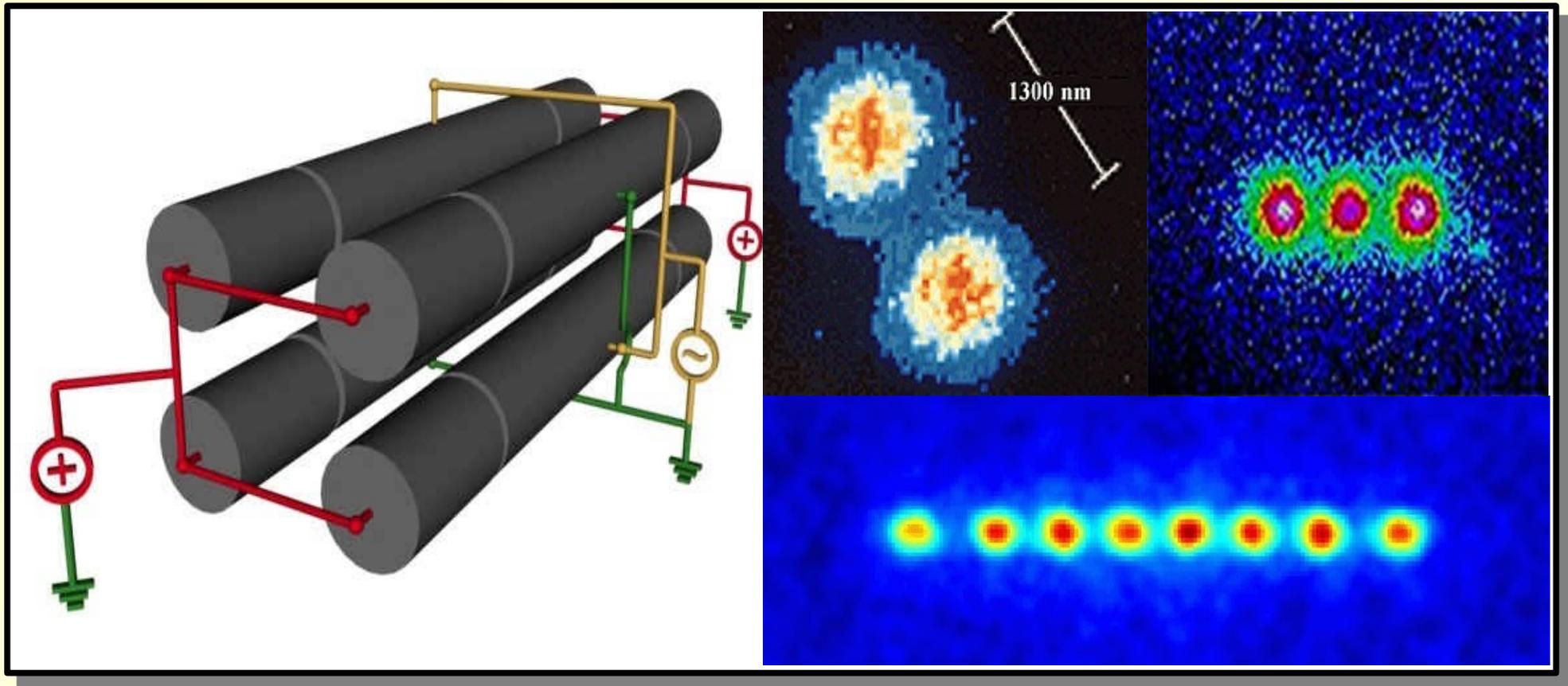


# Trampas de iones



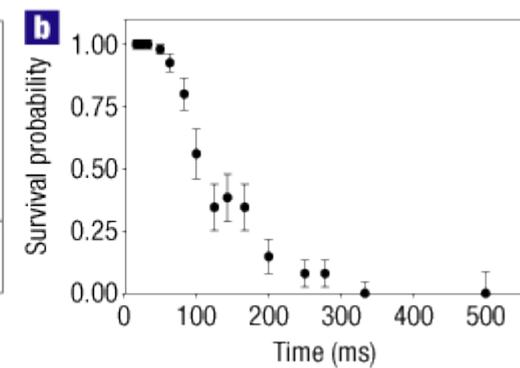
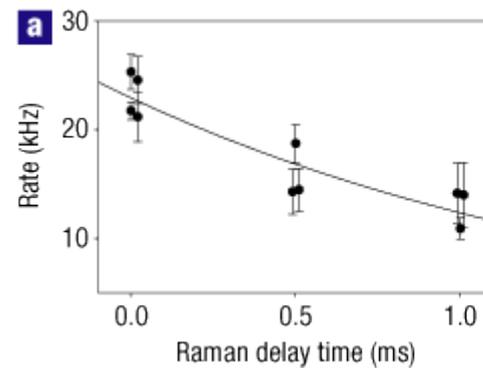
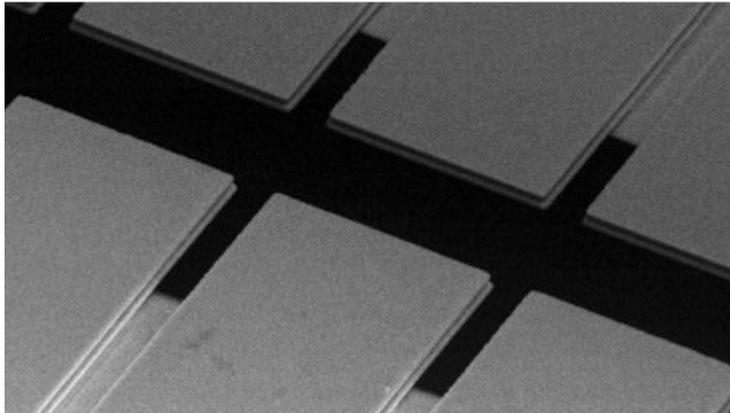
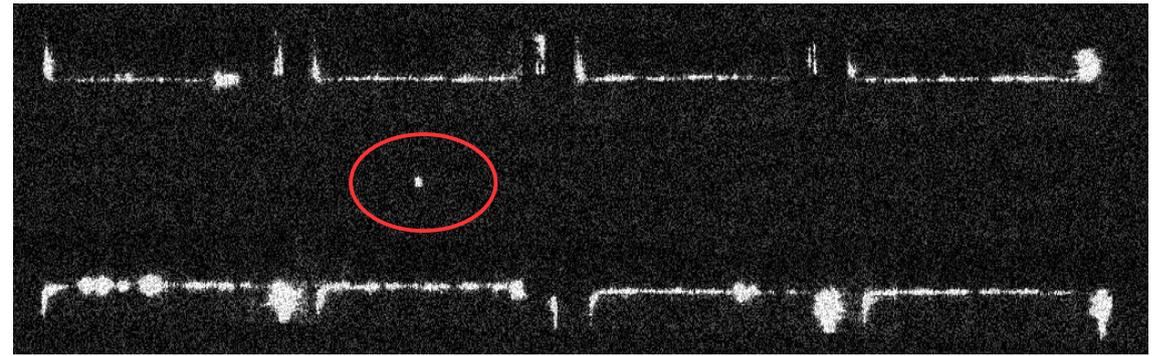
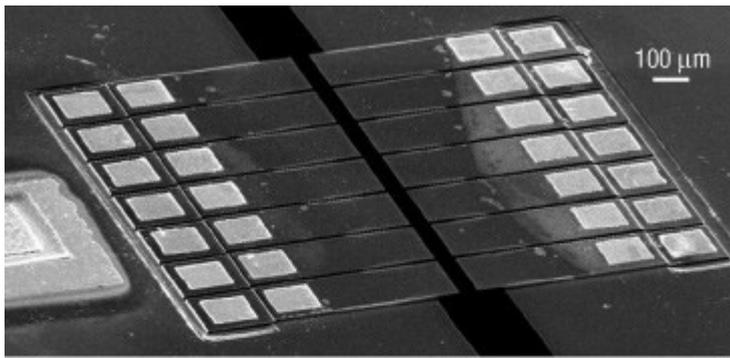
- Campos electromagnéticos estáticos no pueden confinar partículas cargadas.
- La trampa de Paul combina cuatro electrodos con potenciales oscilantes que crean un potencial efectivo.

# Trampas de iones



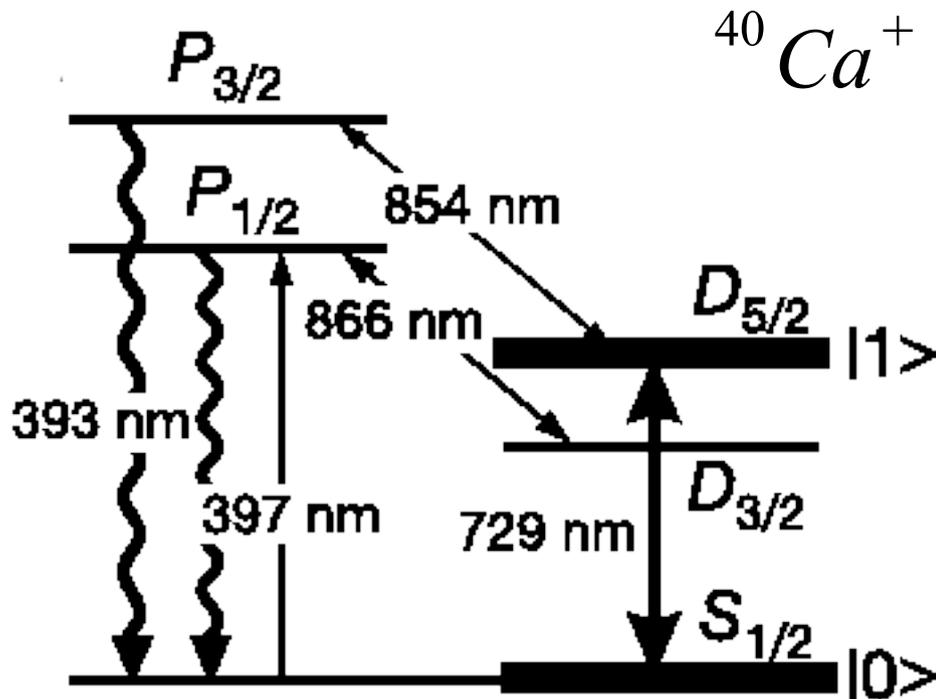
- Se puede confinar un número pequeño de iones formando estructuras estables (= cristales)
- Separación mesoscópica, accesibilidad óptica, largos tiempos de confinamiento.

# Trampas de iones

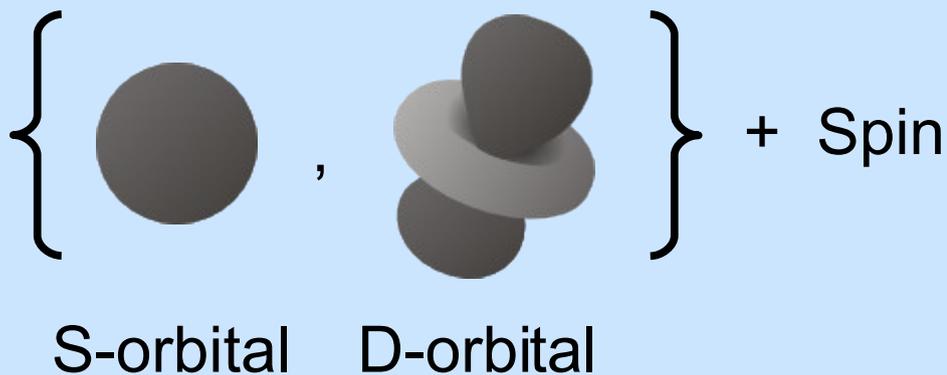


- Microtrampas: estructuras nanométricas, más iones.
- Microprocesadores cuánticos, escalabilidad?
- Nuevos retos: disipación, interacción con superficies, microfabricación,...

# Control de 1 átomo

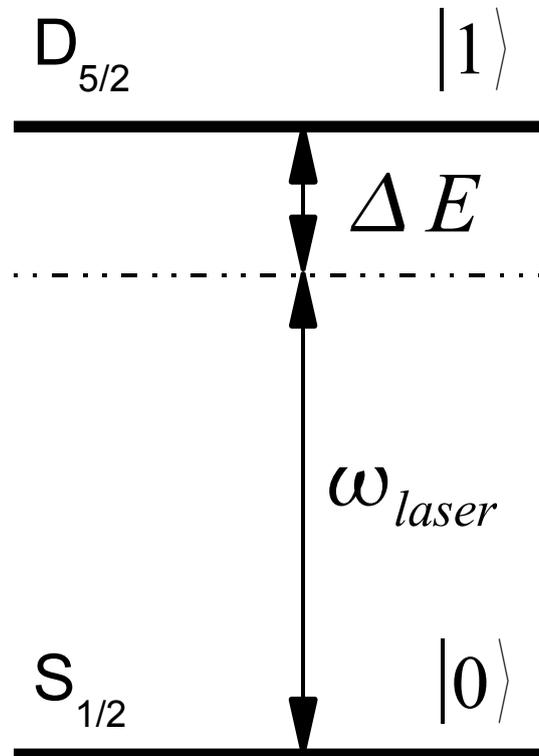


- Múltiples estados atómicos:
  - Orbital electrónico
  - Momento angular
  - Spin del electrón
  - Spin del núcleo
- Algunos estables, otros no.
  - Emisión espontánea
- Podemos excitar selectivamente un átomo al estado deseado.
- Herramientas:
  - Luz
  - Microondas



# Control de 1 átomo

## Esquema de niveles simplificado

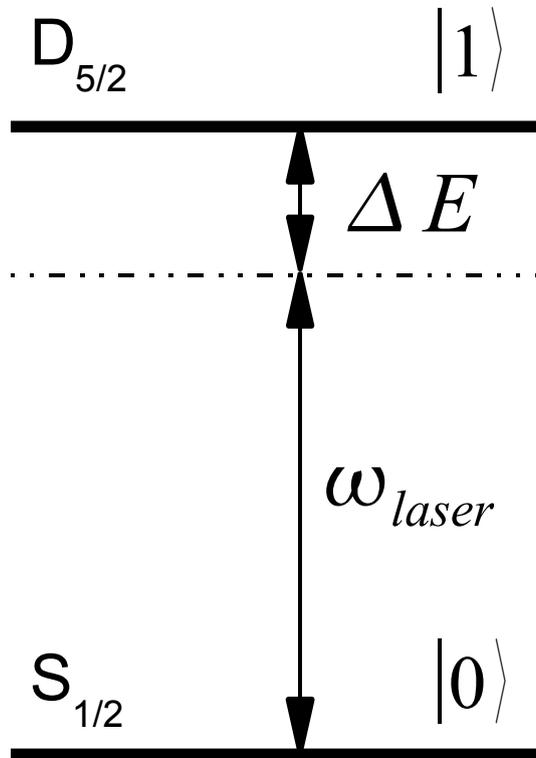


- Un láser acopla ambos estados internos.
- Controlamos la frecuencia del láser y la intensidad
- El sistema evoluciona de acuerdo con el Hamiltoniano

$$H \sim \frac{I_{laser}}{2} (|1\rangle\langle 0| + |0\rangle\langle 1|) + \Delta E |1\rangle\langle 1|$$

# Control de 1 átomo

## Esquema de niveles simplificado



- Un láser acopla ambos estados internos.
- Controlamos la frecuencia del láser y la intensidad
- El sistema evoluciona de acuerdo con el Hamiltoniano

$$H \sim \frac{I_{laser}}{2} \sigma_x + \frac{\Delta E}{2} \sigma_z$$

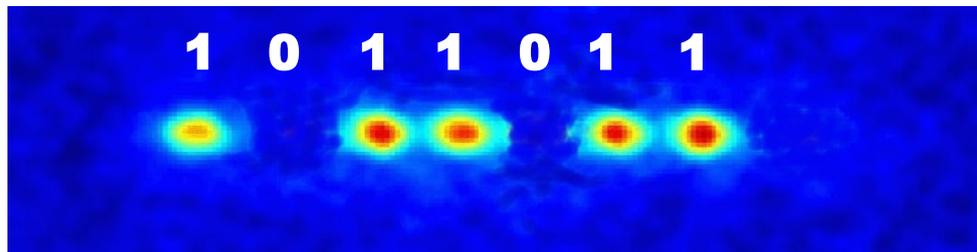
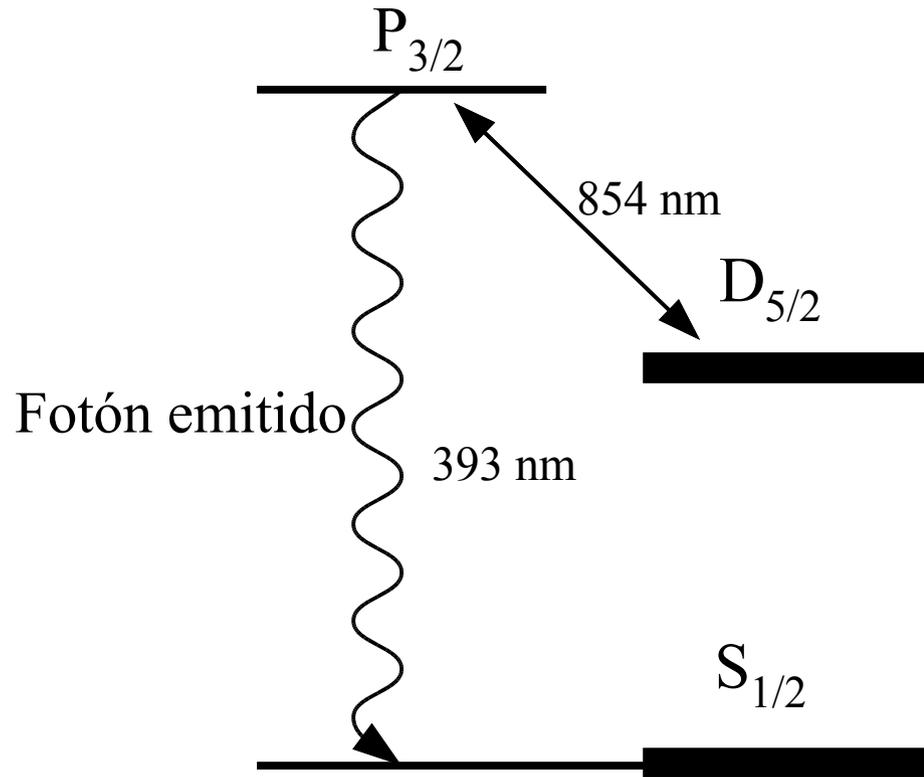
- Al cabo de un tiempo, puerta lógica:

$$U(t) = \exp(-i H t)$$

- Demostrar que *se puede implementar cualquier unitaria local!*

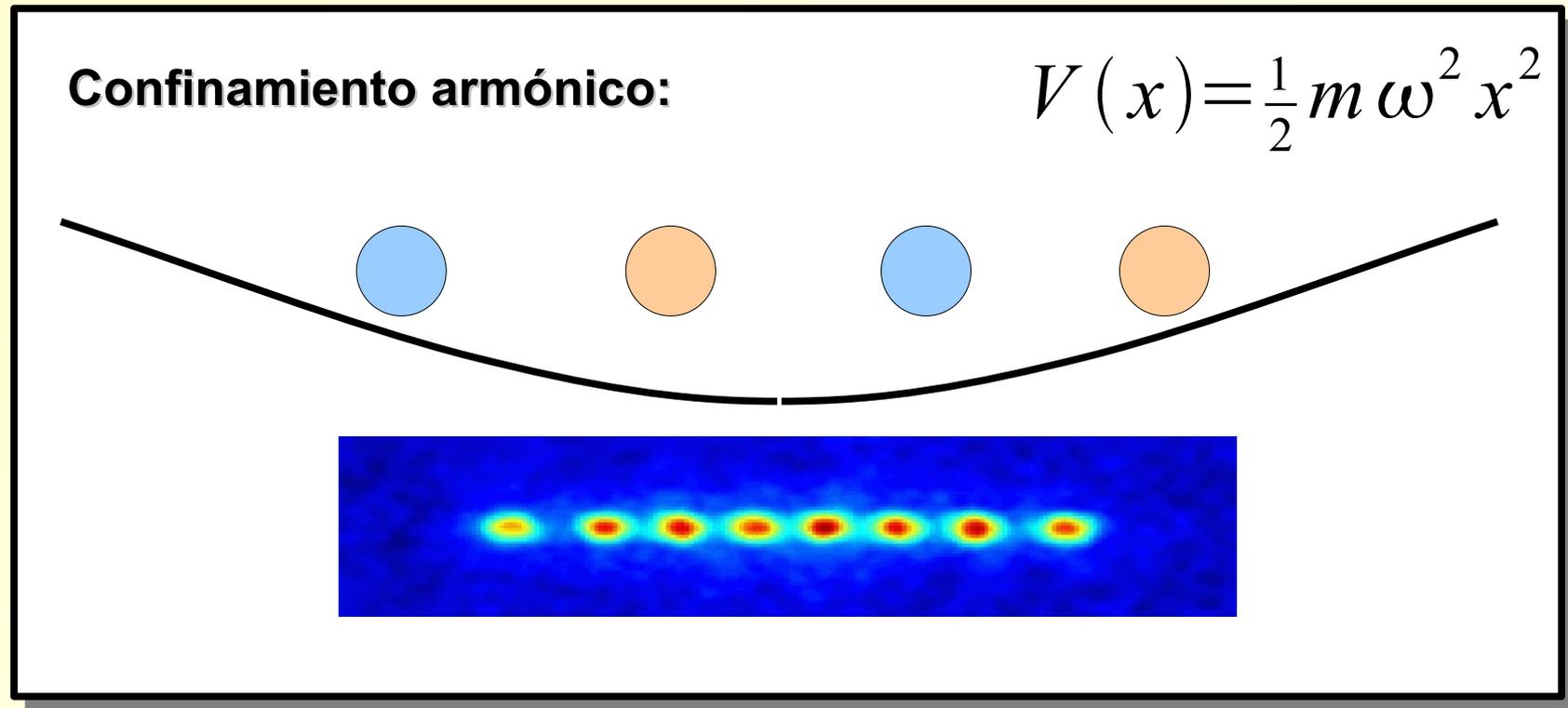
# Medida

Medida destructiva:



- Hay estados inestables que decaen emitiendo un fotón (UV)
- Podemos excitar selectivamente los iones en el qubit 1 a un estado que decaiga.
- La emisión espontánea nos revela el estado de los iones.
- Es una medida destructiva y proyectiva.
- Hacer POVM es mucho más complicado!!!

# Sistema de muchos átomos

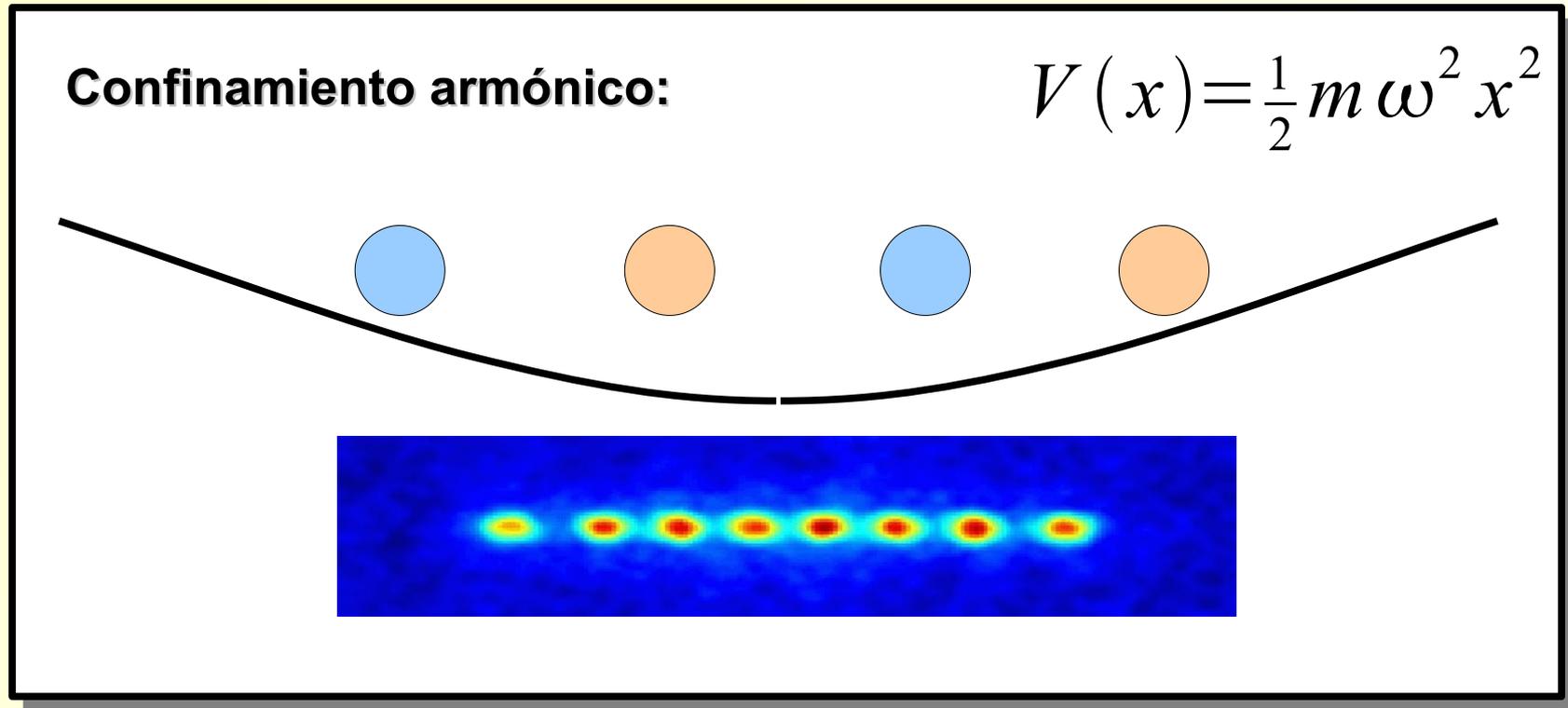


Al potencial de la trampa se suma la repulsión Culombiana...

$$H = \sum_i \left[ \frac{1}{2m} p_i^2 + \frac{1}{2} m \omega^2 x_i^2 \right] + \sum_{i < j} \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 |x_i - x_j|}$$

**Los grados de libertad internos están desacoplados!!!**

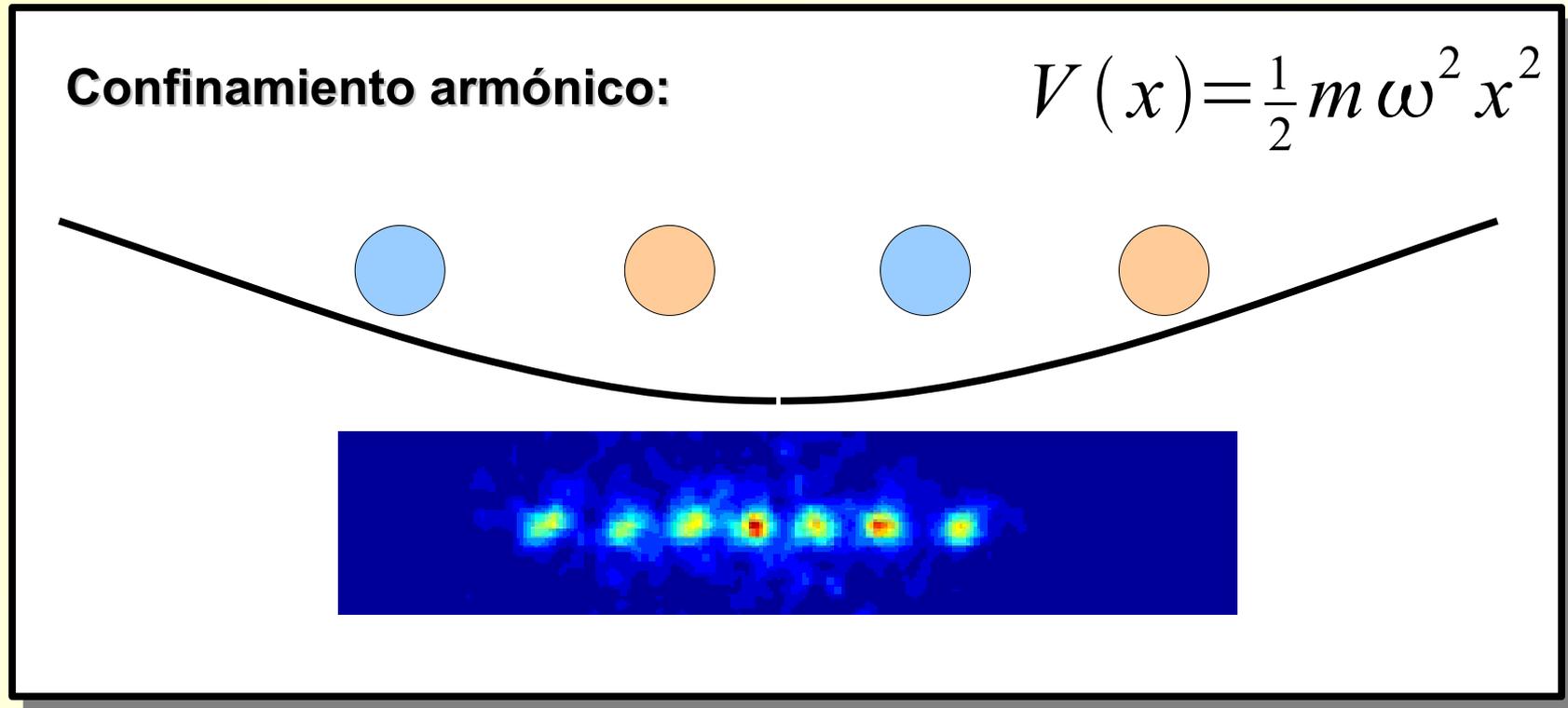
# Sistema de muchos átomos



Posiciones de equilibrio: 
$$\left( \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) (x_i^{(0)}) = 0, \quad \forall i$$

Aproximación armónica: 
$$H := \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i,j} \left( \frac{\partial^2 H}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{x^{(0)}} x_i x_j$$

# Sistema de muchos átomos

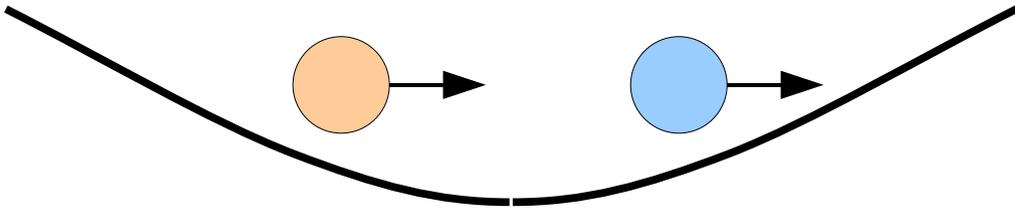


Diagonalizamos alrededor de la posición de equilibrio...

$$H = \sum_{i=1}^N \hbar \Omega_i \left[ \frac{1}{2} P_i^2 + \frac{1}{2} Q_i^2 \right]$$

# Sistema de 2 átomos (ejercicio!)

Centro de masas

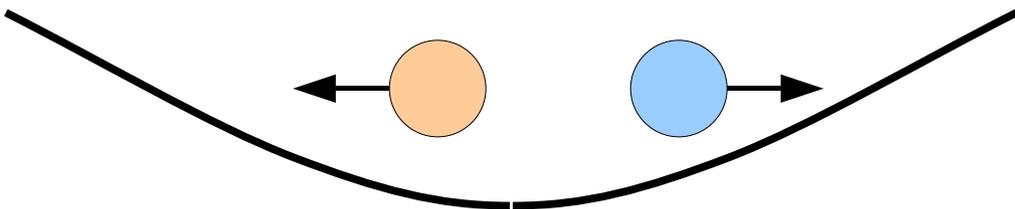


$$Q_1 \sim \frac{1}{2}(x_1 + x_2)$$

$$P_1 \sim (p_1 + p_2)$$

$$\Omega_1 = \omega$$

“Stretch mode”

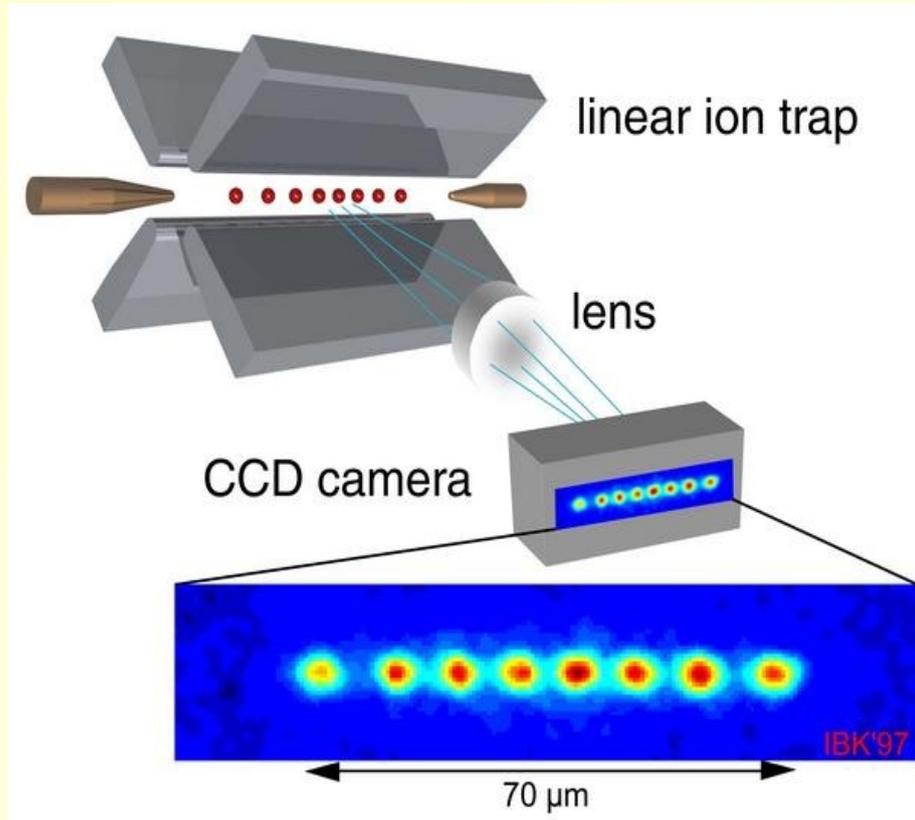


$$Q_2 \sim (x_1 - x_2)$$

$$P_2 \sim (p_1 - p_2)$$

$$\Omega_2 = \sqrt{3} \omega$$

# Modelo final



$$H = \sum_{i=1}^N \hbar \Omega_i \left[ \frac{1}{2} P_i^2 + \frac{1}{2} Q_i^2 \right] + \sum_{n=1}^N \left[ I \sigma_n^x + E_i \sigma_n^z \right]$$