

# Computación cuántica con átomos neutros



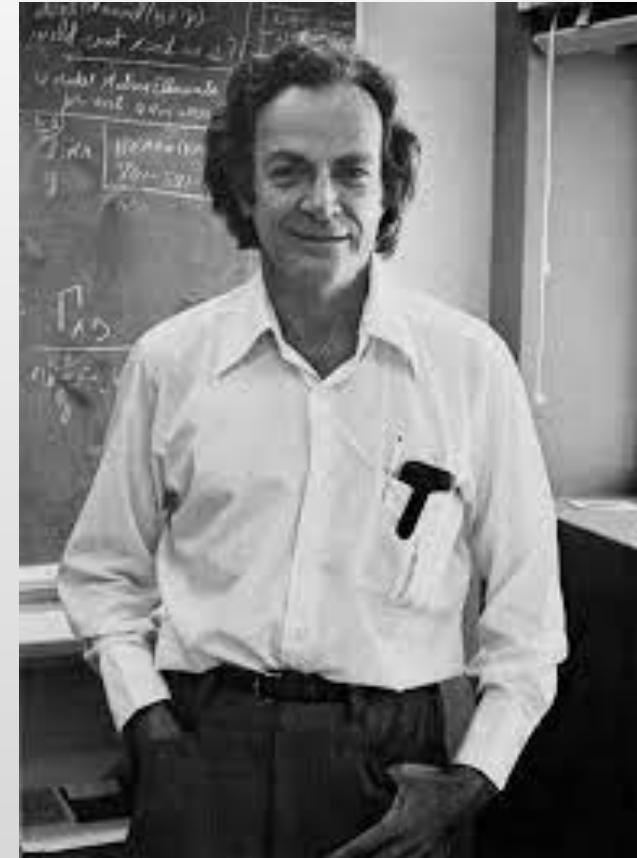
Latin American alliance for  
Capacity buildiNG in Advanced **physics**  
**LA-CoNGA physics**

Alexandra de Castro, PASQAL

18 de abril de 2023

"Para comprender completamente un sistema cuántico, necesitaríamos usar procesadores basados en los principios de la mecánica cuántica."

Richard Feynman, 1982



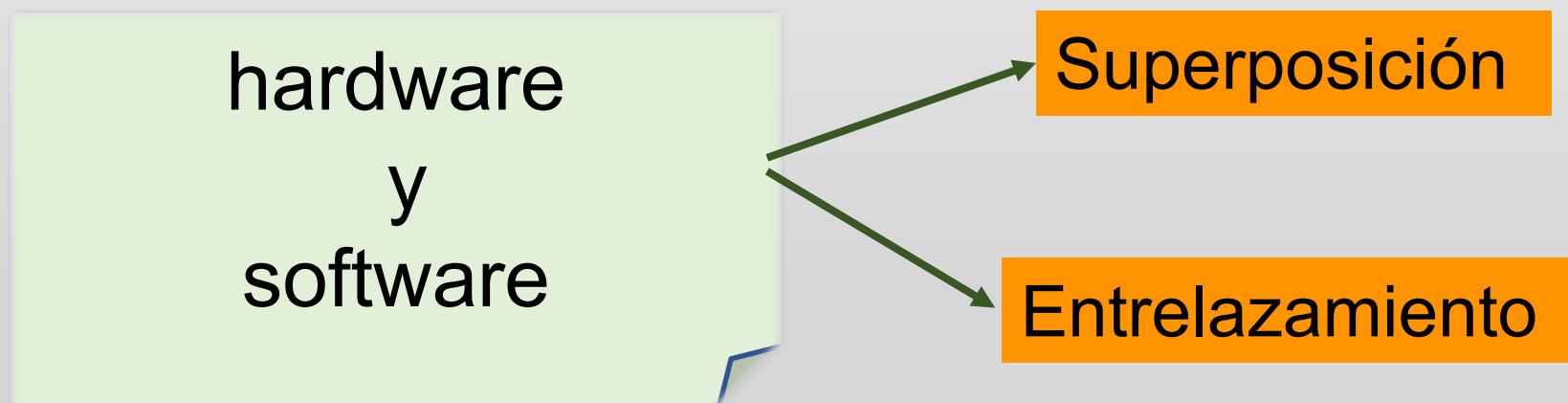
Feynman, R.P. Simulating physics with computers. Int J Theor Phys 21, 467–488 (1982)

# Generalidades importantes sobre la computación cuántica

- Todavía no existe la ventaja cuántica, aunque se ha observado la "supremacía" cuántica.
- Es una investigación multidisciplinar: física cuántica teórica y experimental, óptica y óptica cuántica, computación clásica, redes neurales, física del estado sólido...
- Hay muchos tipos de hardware.
- Hay algoritmos independientes del hardware y otros que están orientados a un solo tipo de hardware.
- Se diseña como nube, no es una computadora personal.
- Colabora con computadoras clásicas.

# ¿Qué es la computación cuántica?

Es un nuevo paradigma de la computación basado completamente en los principios de la mecánica cuántica.



# Qubits

**bit:** 0 o 1

**Qubit:**  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ ,  $|Q\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$

- Niveles de energía electrónica
- Spin
- Niveles de energía nuclear

# Entrelazamiento

Partícula 1 puede estar en  $|0\rangle_1$  o  $|1\rangle_1$

Partícula 2 puede estar en  $|0\rangle_2$  o  $|1\rangle_2$

$$|P1\rangle = a_1|1\rangle_1 + b_1|0\rangle_1 \quad |P2\rangle = a_2|1\rangle_2 + b_2|0\rangle_2$$

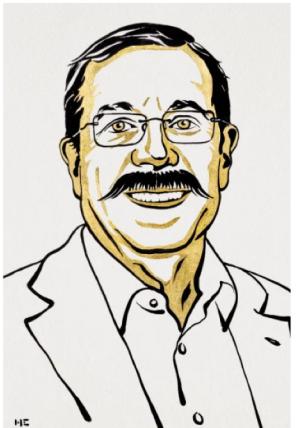
Puedo crear un estado **entrelazado**:

$$|P1, P2\rangle = |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 + |0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2$$

$|P1, P2\rangle$



# Alain Aspect Facts



Alain Aspect  
The Nobel Prize in Physics 2022

Born: 15 June 1947, Agen, France

Affiliation at the time of the award: Institut d'Optique Graduate School – Université Paris-Saclay, Paris, France; École Polytechnique, Palaiseau, France

Prize motivation: “for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”

Prize share: 1/3

III. Niklas Elmehed © Nobel  
Prize Outreach

Subscribe

Latest Issues

SCIENTIFIC  
AMERICAN®

Cart 0

Sign In | Newsletters

SHARE

QUANTUM COMPUTING

## China Shatters “Spooky Action at a Distance” Record, Preps for Quantum Internet

Results from the Micius satellite test quantum entanglement, pointing the way toward hackproof global communications

By Lee Billings on June 15, 2017

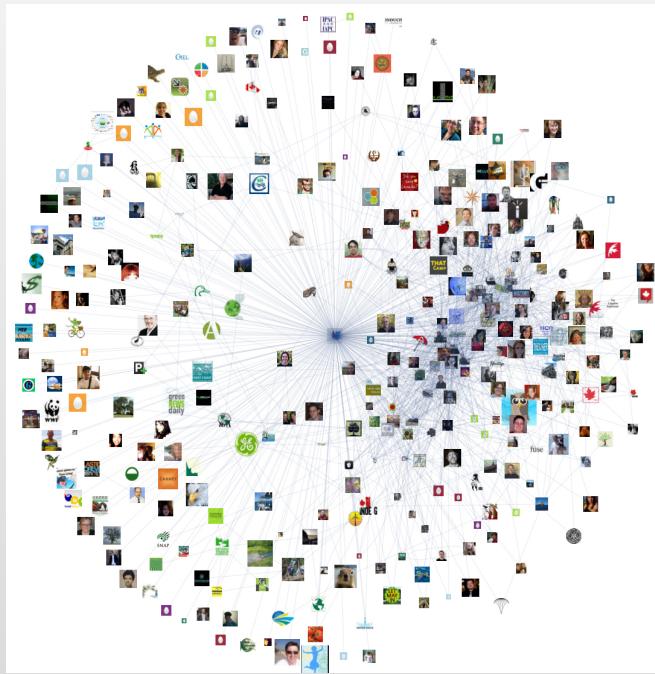
# ¿Qué significa esto?

**Computadora clásica:** Para 2 bits, puedes representar 4 posibles valores: 00, 01, 10 y 11.

**Computadora cuántica:** para 2 qubits, puedes representar los 4 valores en superposición, es decir al mismo tiempo.

En general si tienes N qubits podrías representar  $2^N$  valores al mismo tiempo.

# *Quantum feature map (el mapa cuántico al espacio de las características)*



$$\emptyset \longrightarrow \mathcal{H}$$

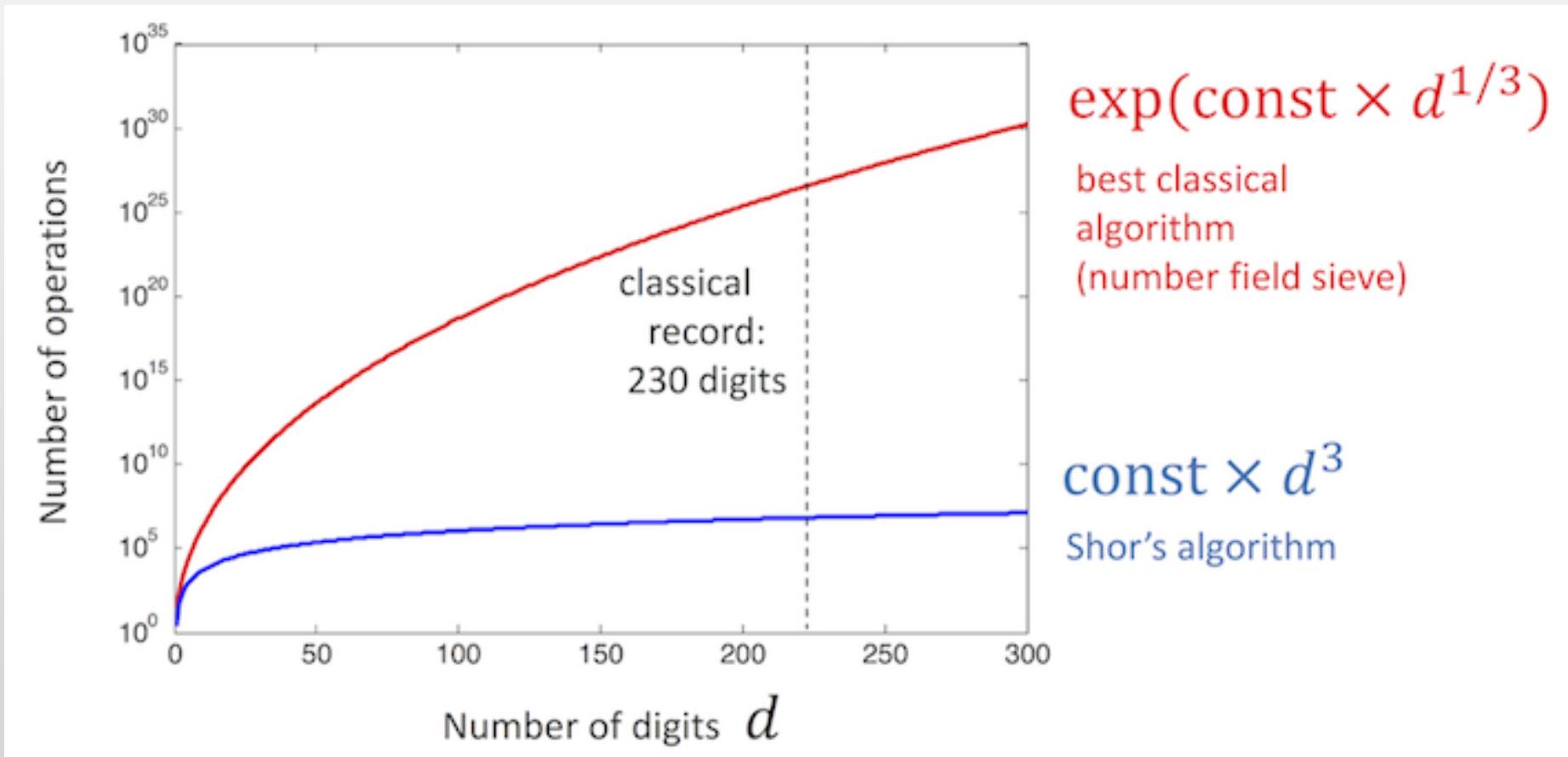
La información se codifica en vectores del espacio de Hilbert.

Para N Qubits los vectores tendrán  $2^N$  dimensiones.

Las **puertas lógicas cuánticas** se construyen usando operadores que actúan sobre el espacio de Hilbert

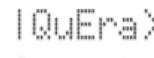
$$\mathcal{O}|\psi\rangle = |\psi'\rangle, \quad |\psi\rangle, |\psi'\rangle \in \mathcal{H}$$

# Ejemplo: el algoritmo de Shor



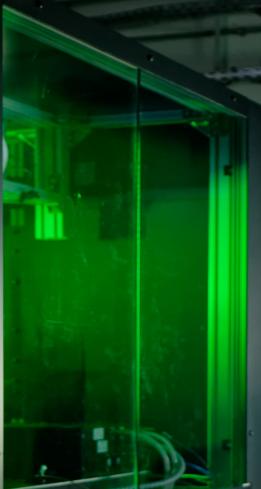
[Shor, P.W.](#) (1994). "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring". *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. IEEE Comput. Soc. Press: 124–134. [doi:10.1109/sfcs.1994.365700](https://doi.org/10.1109/sfcs.1994.365700). ISBN 0818665807. S2CID 15291489.

# Las plataformas disponibles hoy

Neutral atoms	Trapped ions	Quantum dots	Silicon photonics	Superconductors
 atom computing  QuEra COMPUTING INC.	 IONQ  QUANTINUUM	 Silicon Quantum Computing  intel.	 PsiQuantum  XANADII	 Google  rigetti  IBM  D-Wave



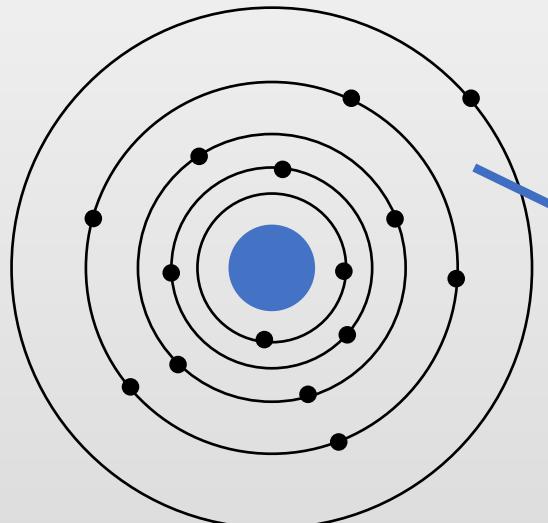
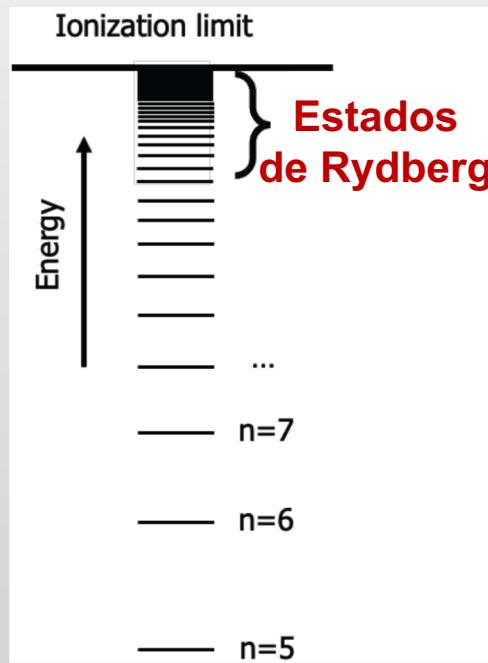
PASQAL



# Qubits y entrelazamiento con átomos neutros

$$|\psi\rangle = a|g\rangle + b|r\rangle$$

## Estados electrónicos

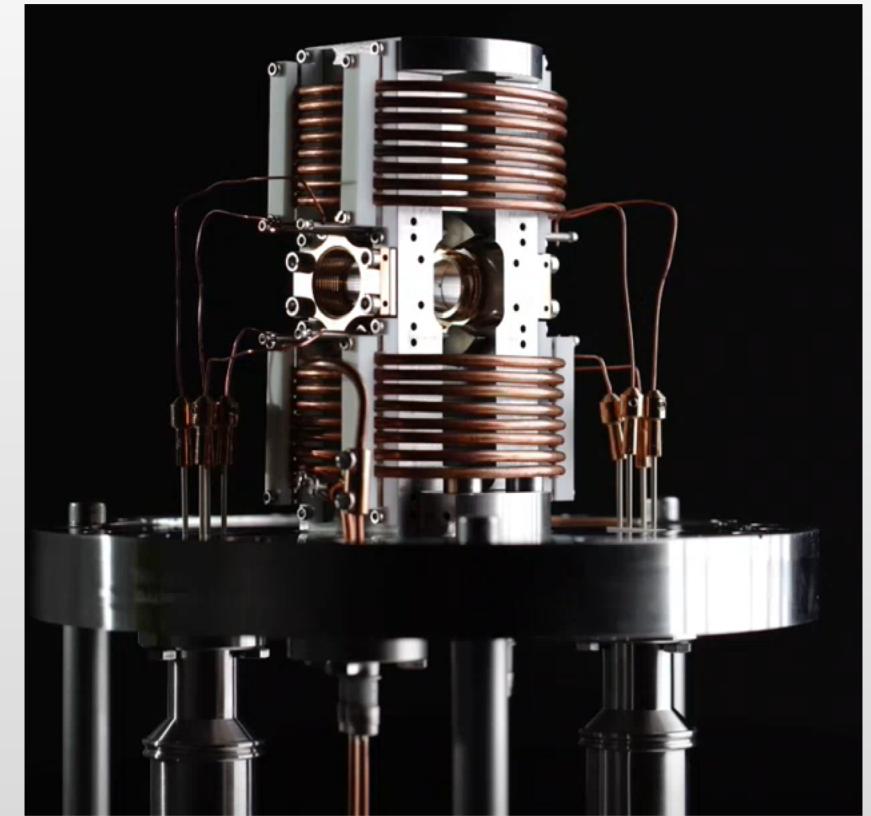
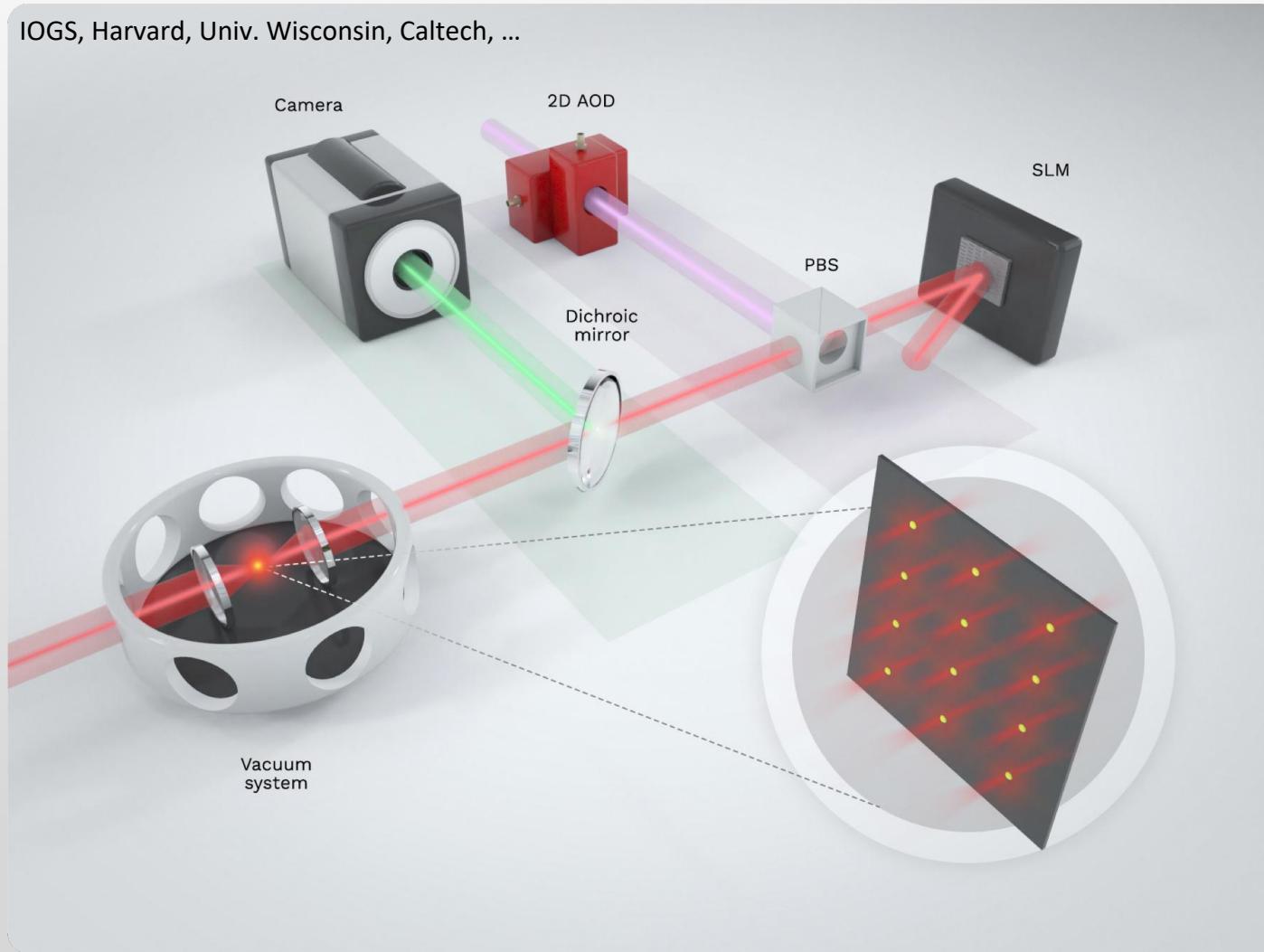


Átomo de rubidium

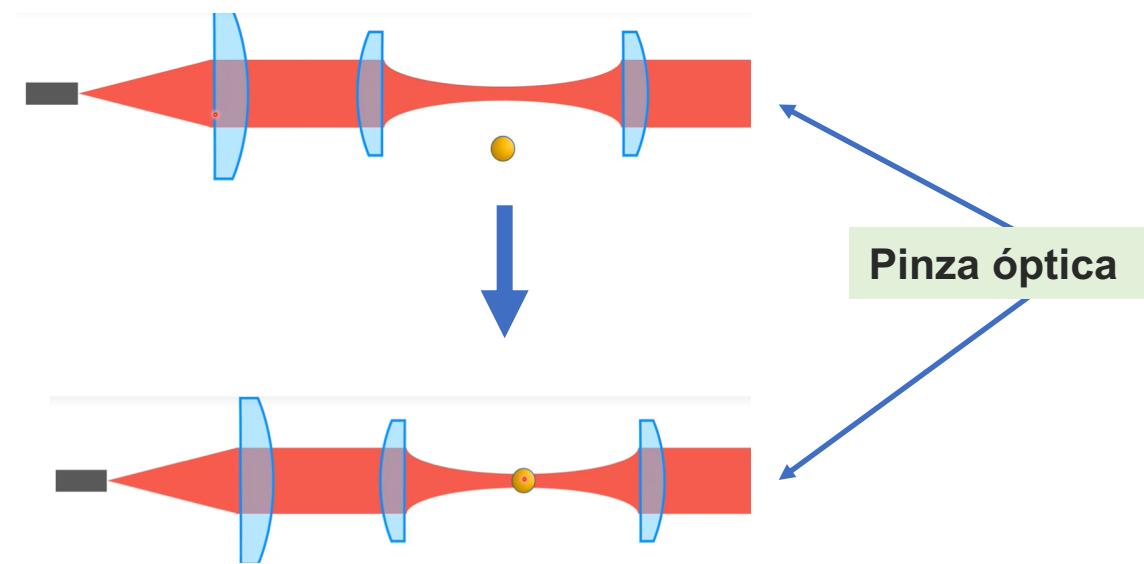
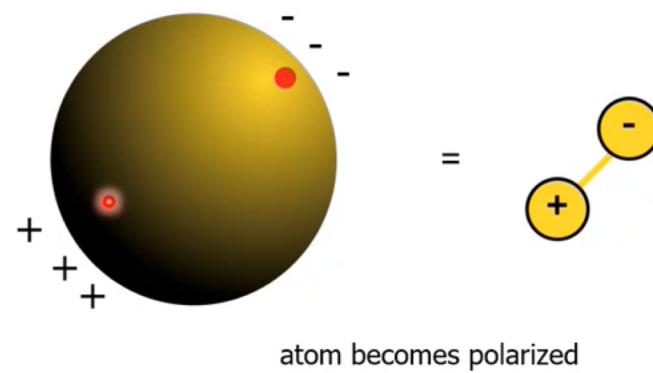
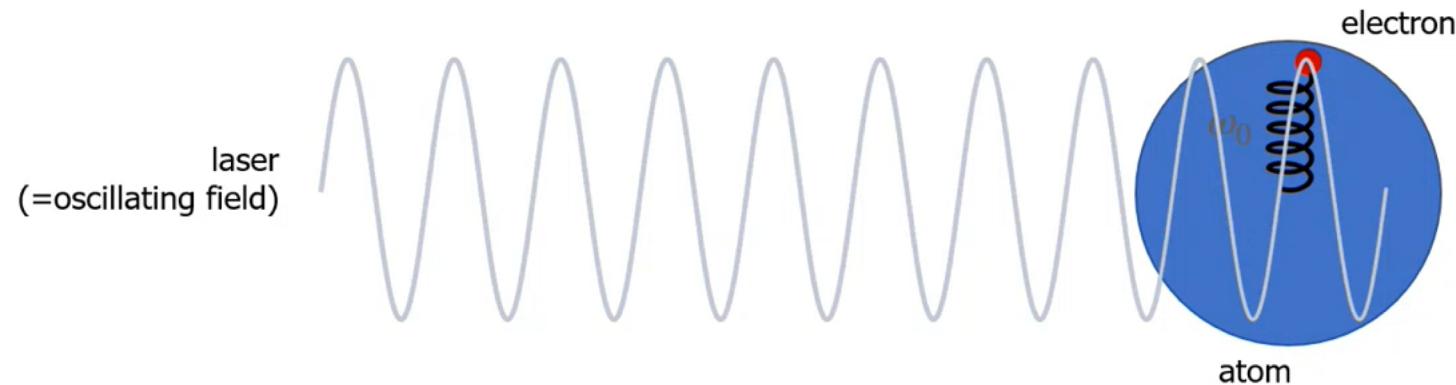
A standard periodic table where the elements in the first column (Group 1) are highlighted with red circles. A blue arrow points from the rubidium atom diagram above to the rubidium element in the table.

Group	Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	H																	He
2	2	Li	Be																Ne
3	3	Na	Mg																Ar
4	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Og
6	6	Cs	Ba	*	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	Rn
7	7	Fr	Ra	*	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts
				*	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117
				*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	No
				*	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	

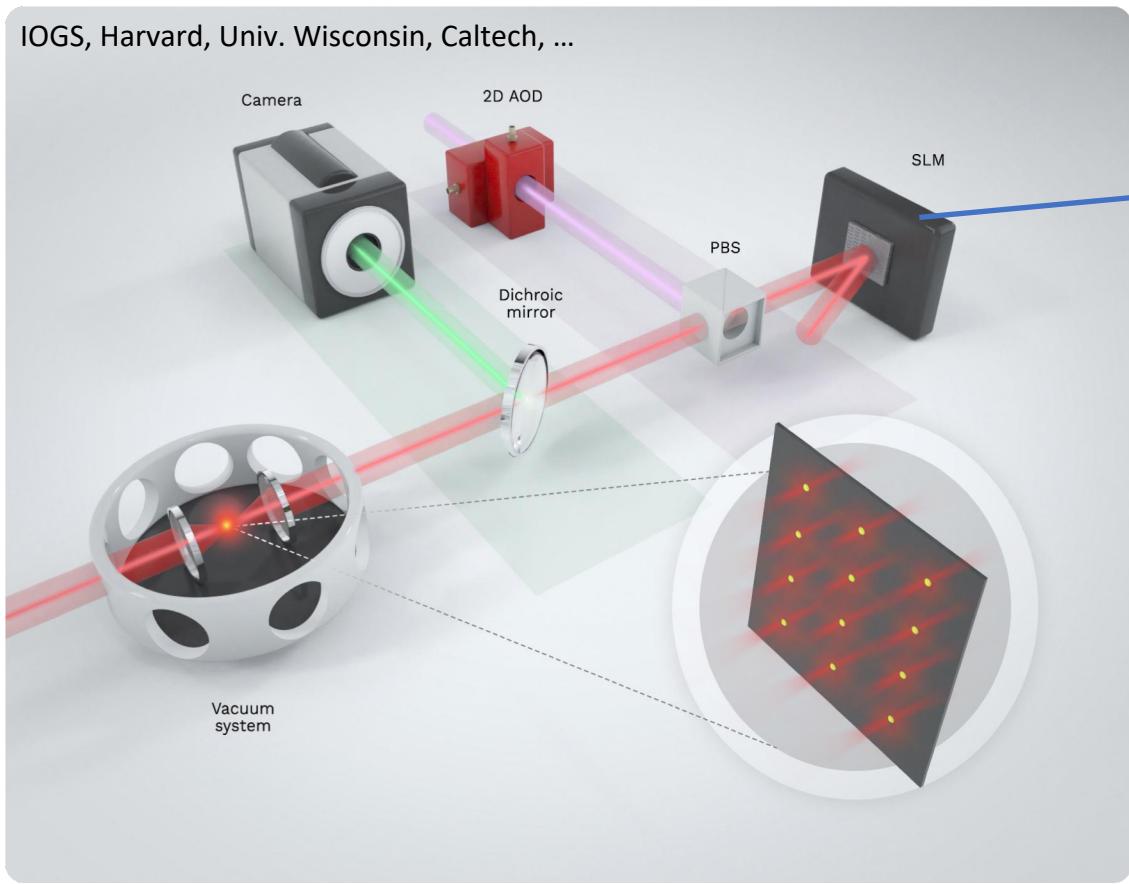
IOGS, Harvard, Univ. Wisconsin, Caltech, ...



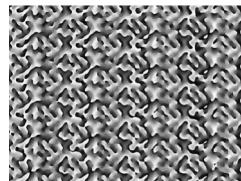
Cámara de vacío:  $10^{-11} \text{ mbar}$



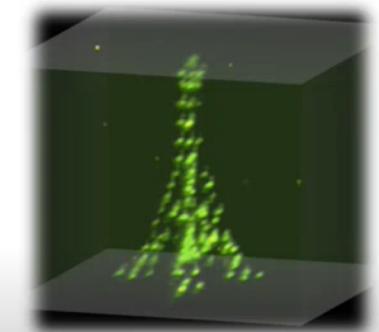
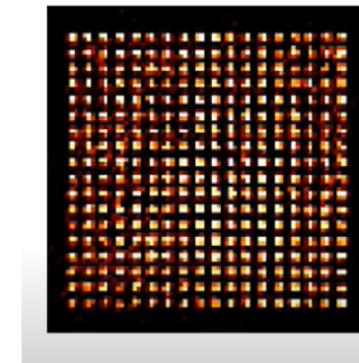
IOGS, Harvard, Univ. Wisconsin, Caltech, ...



Cristal líquido



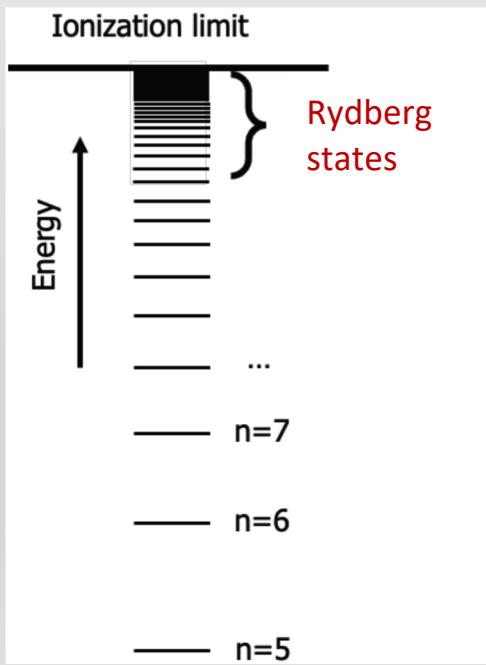
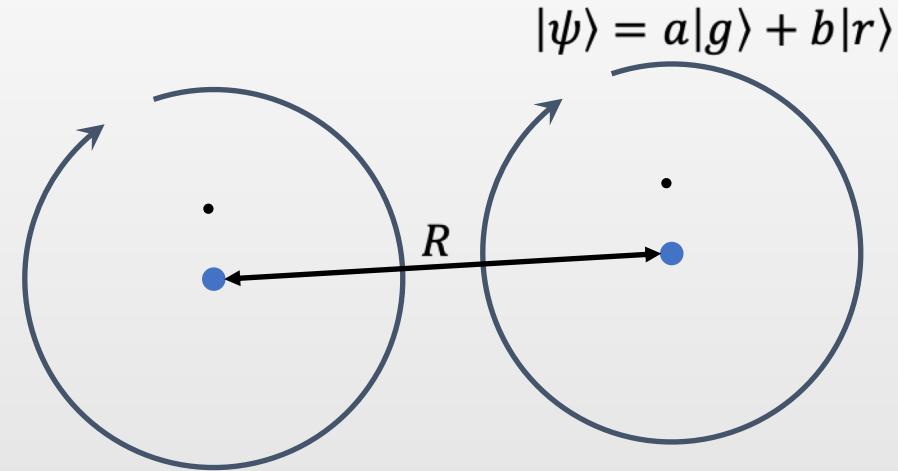
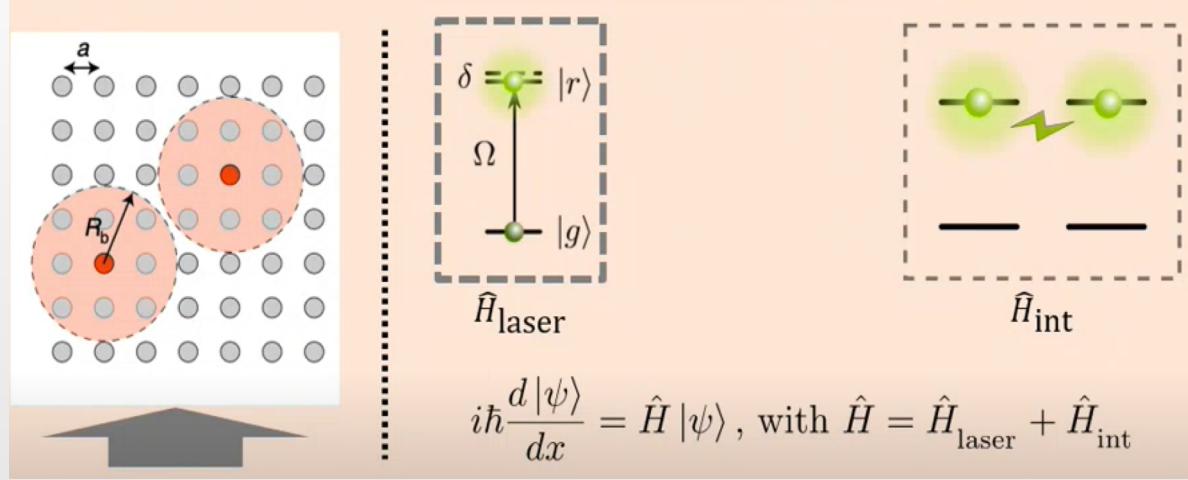
Nogrette et al., PRX (2014)



Efficiency > 99% for 100 atoms, Schymik *et al.*, (2020).

Enhanced atom-by-atom assembly of arbitrary tweezer arrays. *Physical Review A*, 102(6).

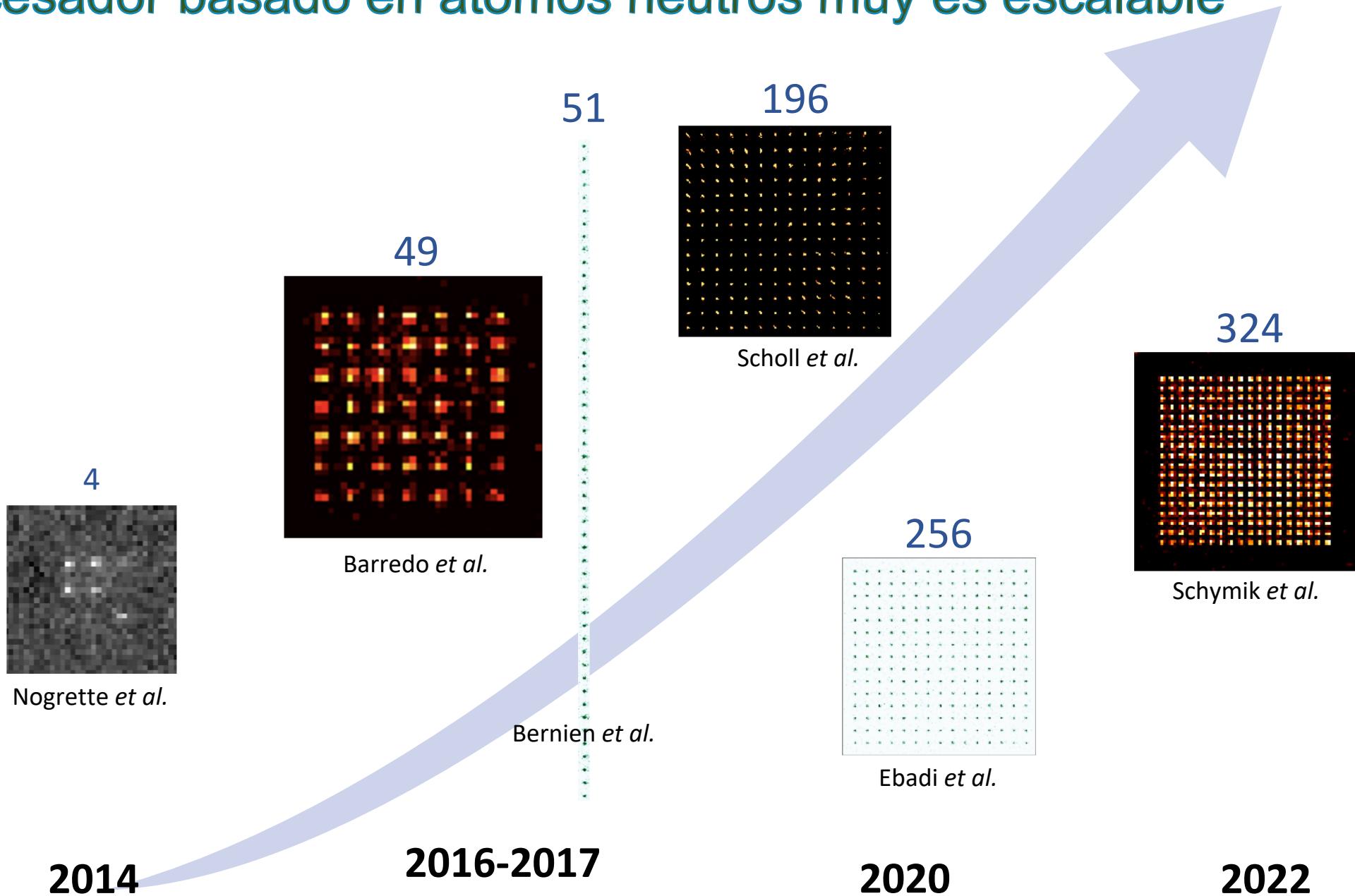
Loïc Henriet, et al., (2020). *Quantum computing with neutral atoms*, [Quantum 4, 327](#).



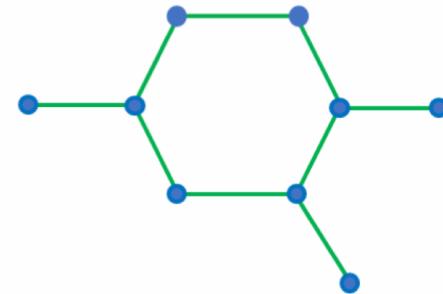
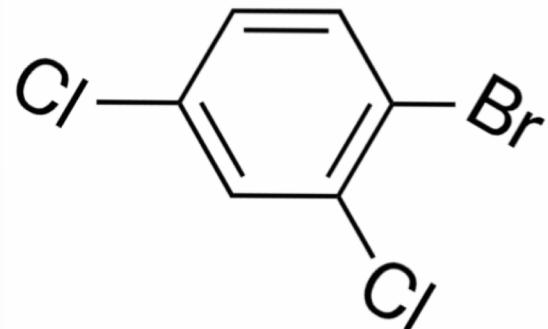
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|rg\rangle + |gr\rangle)$$

Interacción de largo alcance.

# El procesador basado en átomos neutros muy es escalable



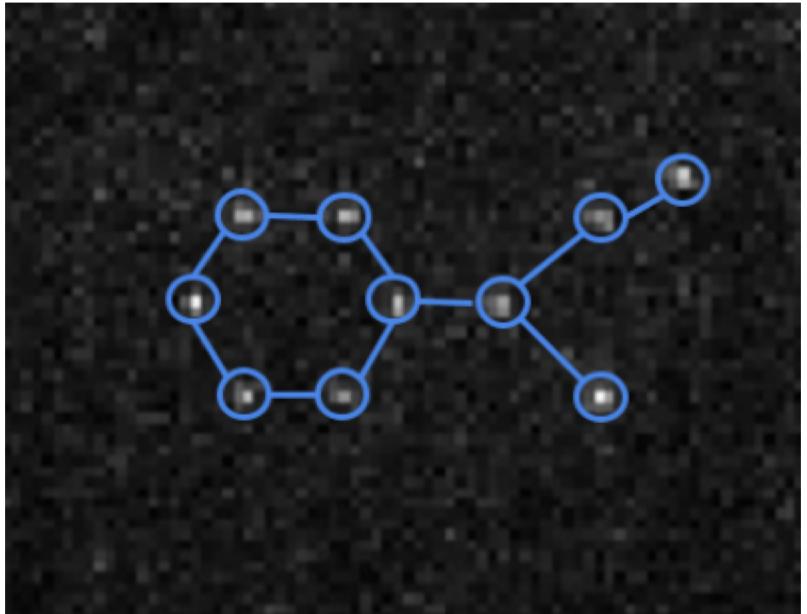
# Ejemplo: caracterización de moléculas con qubits



Cada átomo en el registro es un qubit y cada qubit está codificado en:

$|0\rangle$  = Estado base y  
 $|1\rangle$  = Estado de Rydberg.

Cada vértice del grafo (donde hay un qubit) representa un átomo de la molécula orgánica y cada lado del grafo representa un enlace químico

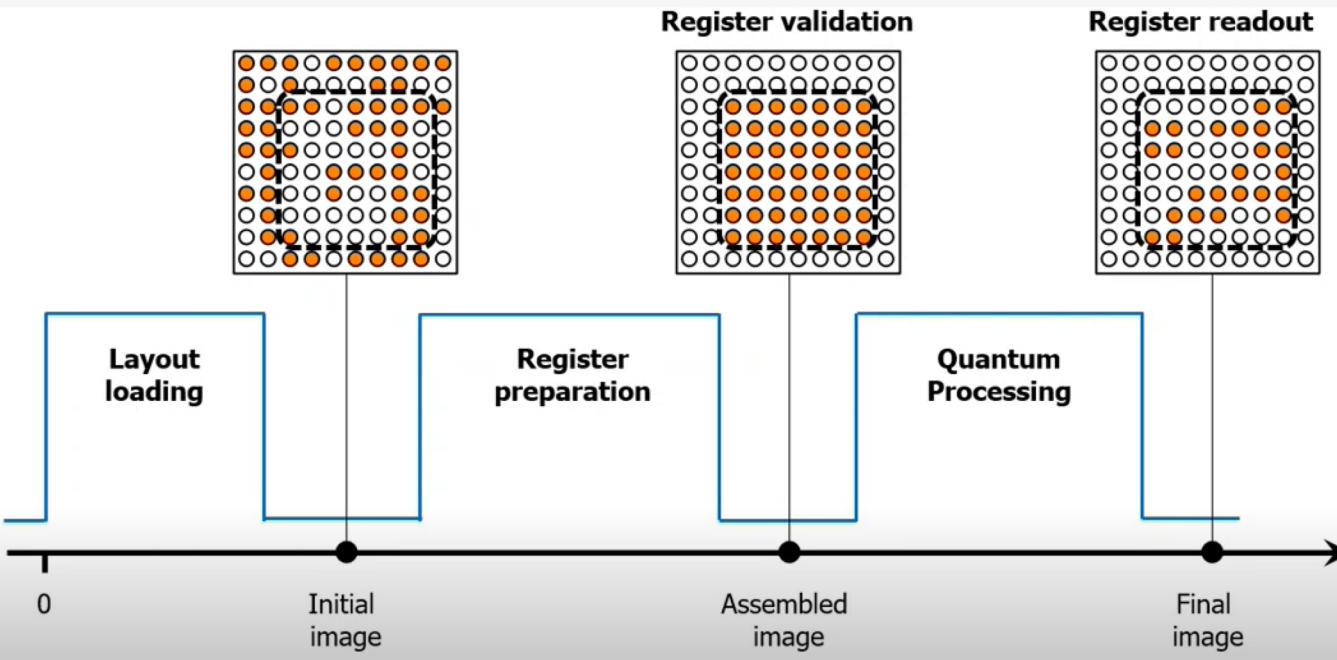


$$r_{NN}=5.3\;\mu m,\qquad \frac{\Omega}{2\pi}=1.0MHz,\qquad$$
$$\frac{\delta}{2\pi}=0.7\;MHz,\qquad t\!\sim\!0.25\;\mu s$$

$$|\psi_{\mathcal{G}}\rangle=U(\mathcal{G};t)\left|0\right\rangle^{\otimes |\mathcal{G}|}$$

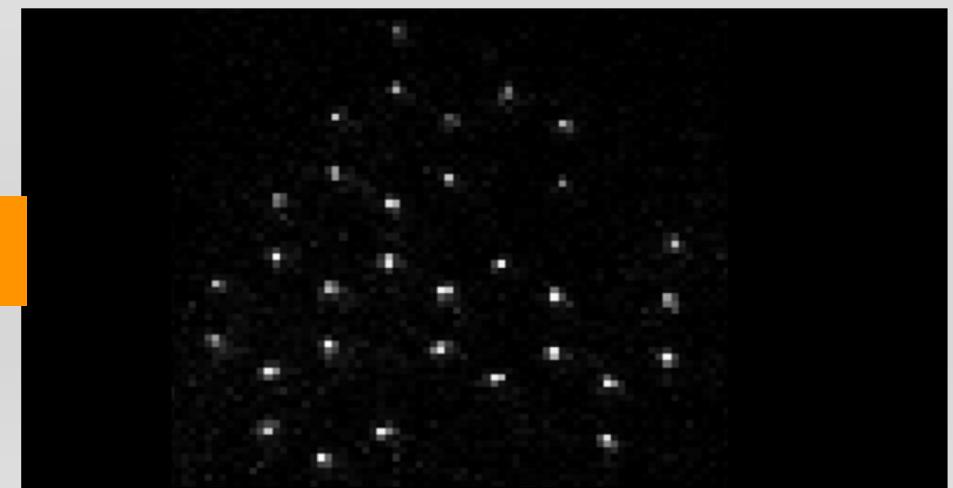
$$U(\mathcal{G};t) ~=~ \mathcal{T}\left[\exp\!\left(-i/\hbar\int_{s=0}^t\hat{\mathcal{H}}_{\mathcal{G}}(s)ds\right)\right]$$

$$\hat{\mathcal{H}}=\hbar\sum_{i=1}^N\left(\frac{\Omega}{2}\hat{\sigma}_i^x-\delta\,\hat{n}_i\right)+\sum_{i< j}\frac{C_6}{|\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_j|^6}\hat{n}_i\hat{n}_j$$

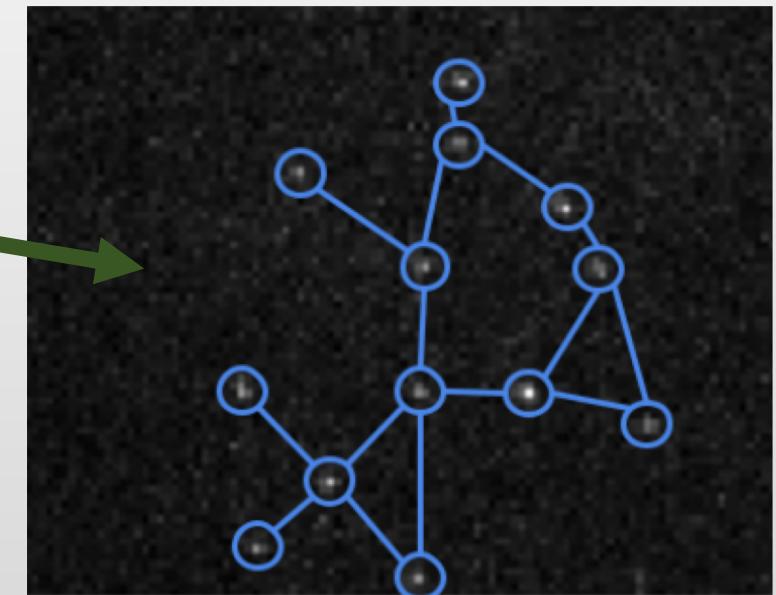
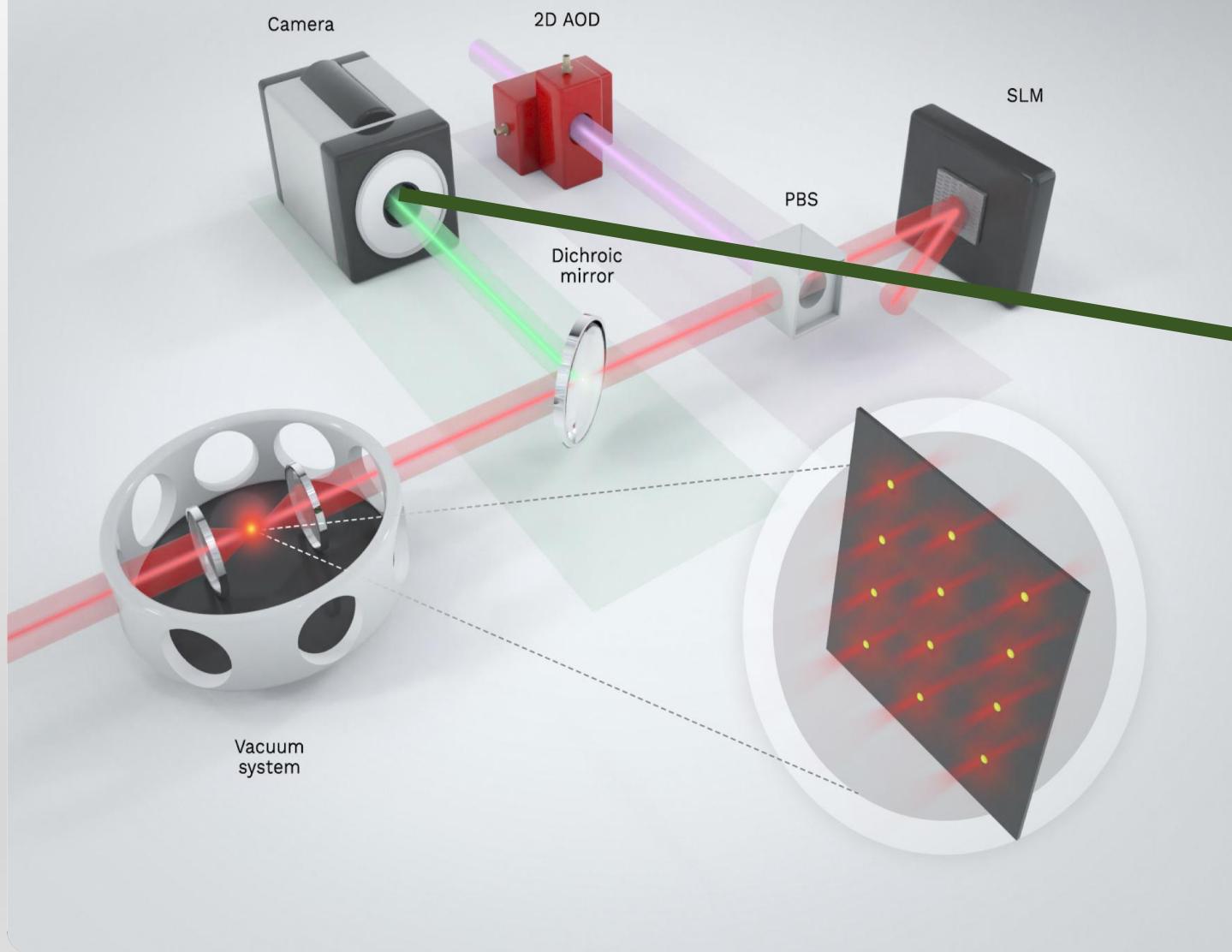


Al final del proceso, se mide un observable: ese es el output. Ejemplo:  $\hat{O} = \sum_i^N \hat{n}_i$  ó  $\hat{O} = \sum_{i,j}^N \hat{\sigma}_j \hat{\sigma}_i$ .

Moléculas orgánicas hasta de 32 átomos



IOGS, Harvard, Univ. Wisconsin, Caltech, ...





I WANT TO BELIEVE