

Premi Nobel de Física 2012: els “Gedankenexperimente” de la Mecànica Quàntica fets realitat

Jordi Mompart

Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona



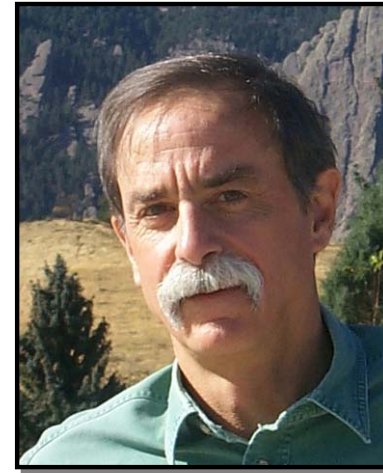


2012



Serge Haroche

*Collège de France and
Ecole Normale Supérieure, Paris, France*

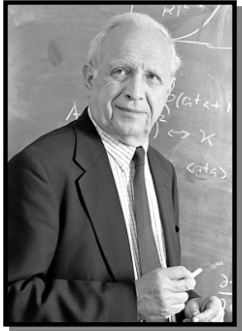


David J. Wineland

*National Institute of Standards and Technology (NIST) and
University of Colorado Boulder, CO, USA*

“for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems”

▶ ELS DARRERS PREMIS NOBEL EN ÒPTICA QUÀNTICA



Roy J. Glauber



John L. Hall

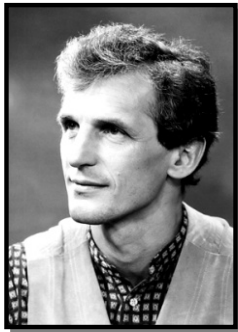


Theodor W. Hänsch

The Nobel Prize in Physics **2005** was divided, one half awarded to Roy J. Glauber "*for his contribution to the quantum theory of optical coherence*", the other half jointly to John L. Hall and Theodor W. Hänsch "*for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique*".



Eric A. Cornell



Wolfgang Ketterle



Carl E. Wieman

The Nobel Prize in Physics **2001** was awarded jointly to Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle and Carl E. Wieman "*for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates*".



Steven Chu



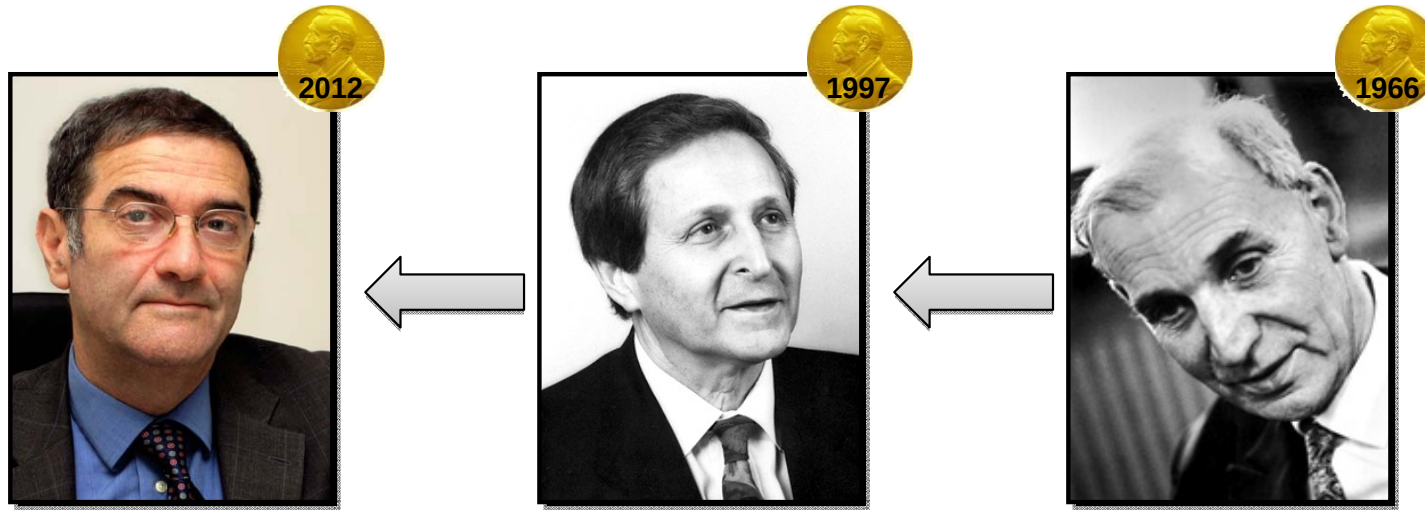
Claude Cohen-Tannoudji



William D. Phillips

The Nobel Prize in Physics **1997** was awarded jointly to Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji and William D. Phillips "*for development of methods to cool and trap atoms with laser light*".

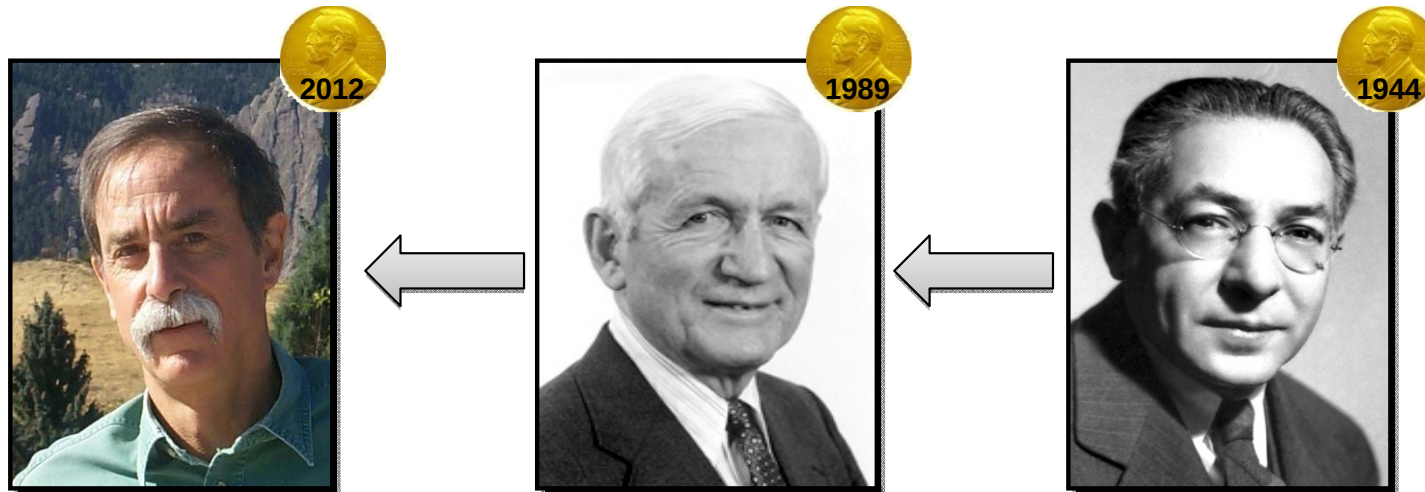
▶ LA IMPORTÀNCIA DE TRIAR BÉ EL DIRECTOR DE TESI



Serge Haroche

Claude Cohen-Tannoudji

Alfred Kastler



David Wineland

Norman F. Ramsey

Isidor I. Rabi

► QUINS SISTEMES QUÀNTICS INDIVIDUALS?

Una sola partícula atrapada

S. Haroche: **Un sol fotó** (o cap, o uns pocs)
observat i manipulat amb àtoms

D. Wineland: **Un ió** (o uns pocs)
observat i manipulat amb llum

- ✓ Sistemes físicament força diferents però conceptualment molt semblants.
- ✓ En ambdós casos, la seva formulació matemàtica es realitza mitjançant el **Model de Jaynes-Cummings** (1963):

Un sistema de dos nivells acoblat
a un oscil·lador harmònic quantitzat
(electromagnètic o mecànic)

1. LA MISTERIOSA MECÀNICA QUÀNTICA

2. UNA MINI-CURS D'ÒPTICA QUÀNTICA

3. CAPTURA I MANIPULACIÓ DE FOTONS INDIVIDUALS (S. HAROCHE)

- Electrodinàmica quàntica en cavitats
- Oscil·lacions de Rabi del buit de fotons
- Entrellaçament entre un mode del camp e.m. i un àtom

4. CAPTURA I MANIPULACIÓ D'IONS INDIVIDUALS (D. WINELAND)

- Trampes de Penning i de Paul
- Refredament mitjançant làser
- Entrellaçament entre ions. Portes lògiques quàntiques
- Relotges atòmics

5. CONCLUSIONS

1. LA MISTERIOSA MECÀNICA QUÀNTICA

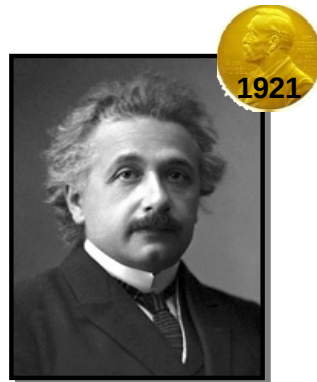
1. LA MISTERIOSA MECÀNICA QUÀNTICA

► ELS “GEDANKENEXPERIMENTE”

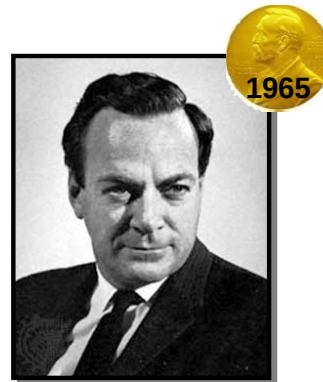
- El gat de Schrödinger (E. Schrödinger, 1935)
- La paradoxa EPR (Einstein-Podolsky-Rosen, 1935)
- “Quantum non-demolition measurements” (V. B. Braginsky, 1975)
- L'efecte Zeno quàntic (G. Sudarshan, B. Misra, 1977)
- El computador quàntic (R. Feynman, 1982)



Erwin Schrödinger



Albert Einstein

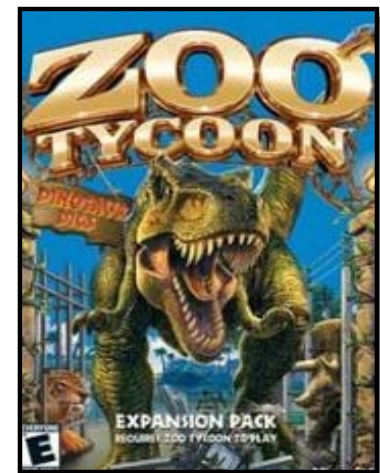


Richard Feynman

“We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences...”

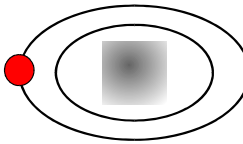
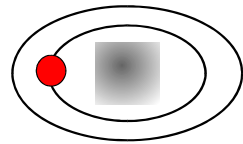
Erwin Schrödinger

British Journal of the Philosophy of Sciences, Vol. 3, 1952

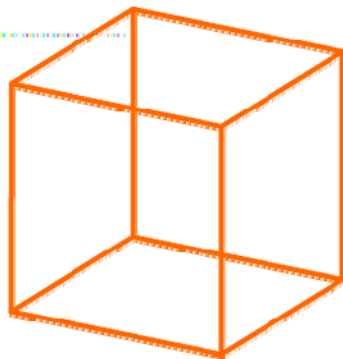
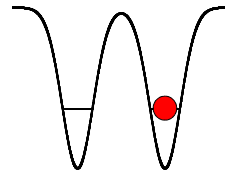
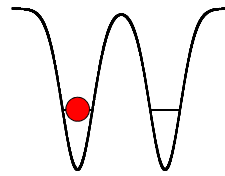


▶ EL PRINCIPI DE SUPERPOSICIÓ

Nivells Electrònics



Posició



No hi ha elements de realitat
fins al moment de l'observació

"The original state must be regarded as the result of a kind of superposition of the two or more new states, in a way that cannot be conceived on classical ideas."

Paul M. Dirac
The Principles of Quantum Mechanics,
Clarendon-Press Oxford, 1930

$$|\varphi\rangle = a|1\rangle + b|2\rangle \quad \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \in C^2 \quad p_a = aa^* = |a|^2$$

"God doesn't play dice with the world."

Albert Einstein
Conversation with William Hermanns, 1943

► EL GAT DE SCHRÖDINGER



Erwin Schrödinger, 1935

Dos possibles estats:

$$|A\rangle \otimes |\text{gat viu}\rangle$$

$$|A^*\rangle \otimes |\text{gat mort}\rangle$$

Estat del sistema, abans de l'observació:

$$|\varphi\rangle = a|A\rangle \otimes |\text{gat viu}\rangle + b|A^*\rangle \otimes |\text{gat mort}\rangle$$

“Do you really think the moon is not there if you are not looking at it?”

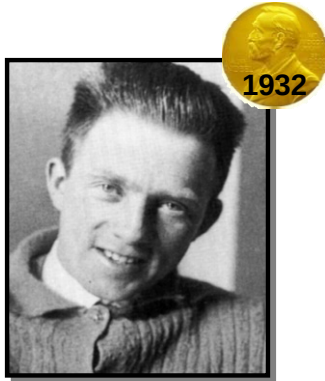
Albert Einstein

Conversations with Abraham Pais

1. LA MISTERIOSA MECÀNICA QUÀNTICA

▶ LA PARADOXA EPR

El Principi d'Incertesa de Heisenberg



No es pot saber, alhora i amb total precisió, el valor de certs observables com per exemple la posició i el moment d'una partícula.

Werner Heisenberg, 1927

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



A. Einstein

B. Podolsky

N. Rosen

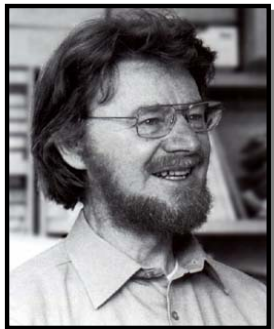
A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

Phys. Rev. **47**, 777–780 (1935)



- **Realisme versus acció a distància (no-localitat)**



John S. Bell,

On the Einstein Podolsky Rosen Paradox,
Physics **1**, 3, 195-200 (1964)

No-localitat!!!

► L'ENTRELLAÇAMENT

Tinguem dues partícules cadascuna amb dos possibles estats $|0\rangle$ i $|1\rangle$

Estats separables: $|0\rangle \otimes |0\rangle$; $|1\rangle \otimes |1\rangle$; $|0\rangle \otimes |1\rangle$; $|1\rangle \otimes |0\rangle$

Els estats de Bell: $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |0\rangle + |1\rangle \otimes |1\rangle)$

$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |0\rangle - |1\rangle \otimes |1\rangle)$

$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |1\rangle + |1\rangle \otimes |0\rangle)$

$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \otimes |1\rangle - |1\rangle \otimes |0\rangle)$

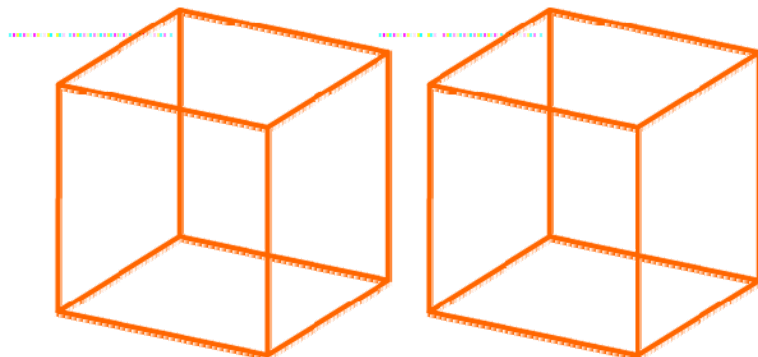
Correlacions quàntiques:

- *Entrellaçament*
- *Verschränkung*
- *Entanglement*



Informació quàntica:

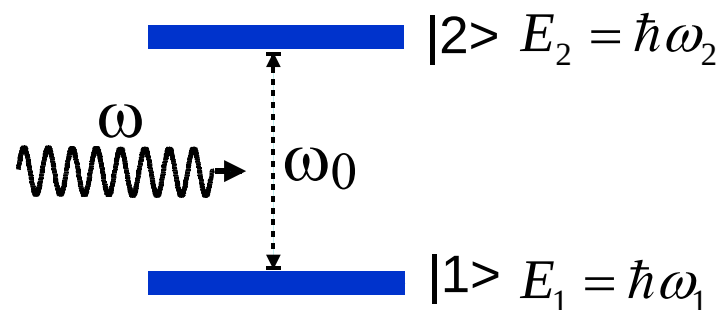
- Criptografia quàntica
- Computació quàntica



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\left| \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \end{array} \right\rangle + e^{i\varphi} \left| \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \end{array} \right\rangle \right)$$

2. UNA MINI-CURS D'ÒPTICA QUÀNTICA

► INTERACCIÓ D'UN ÀTOM DE DOS NIVELLS AMB UN CA



$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t)$$

Solució general (per a $\omega = \omega_0$):

$$|\psi(t)\rangle = \cos\left(\frac{\Omega}{2}t\right)|1\rangle + i \sin\left(\frac{\Omega}{2}t\right)|2\rangle$$

$$\Omega \equiv \frac{\vec{\mu}_0 \cdot \vec{E}_0}{\hbar} \quad \text{és la freqüència de Rabi}$$

Oscil·lacions de Rabi:

$$\begin{aligned} \Omega t = 0 & \Rightarrow |\psi\rangle = |1\rangle \\ \Omega t = \pi/2 & \Rightarrow |\psi\rangle = (\sqrt{2}/2)(|1\rangle + i|2\rangle) \\ \Omega t = \pi & \Rightarrow |\psi\rangle = i|2\rangle \\ \Omega t = 3\pi/2 & \Rightarrow |\psi\rangle = (\sqrt{2}/2)(-|1\rangle + i|2\rangle) \\ \Omega t = 2\pi & \Rightarrow |\psi\rangle = -|1\rangle \\ \Omega t = 5\pi/2 & \Rightarrow |\psi\rangle = -(\sqrt{2}/2)(|1\rangle + i|2\rangle) \\ \Omega t = 3\pi & \Rightarrow |\psi\rangle = -i|2\rangle \\ \Omega t = 7\pi/2 & \Rightarrow |\psi\rangle = (\sqrt{2}/2)(|1\rangle - i|2\rangle) \\ \Omega t = 4\pi & \Rightarrow |\psi\rangle = |1\rangle \end{aligned}$$

Per a camps quàntics:

$$\Omega \rightarrow \Omega\sqrt{n+1}$$

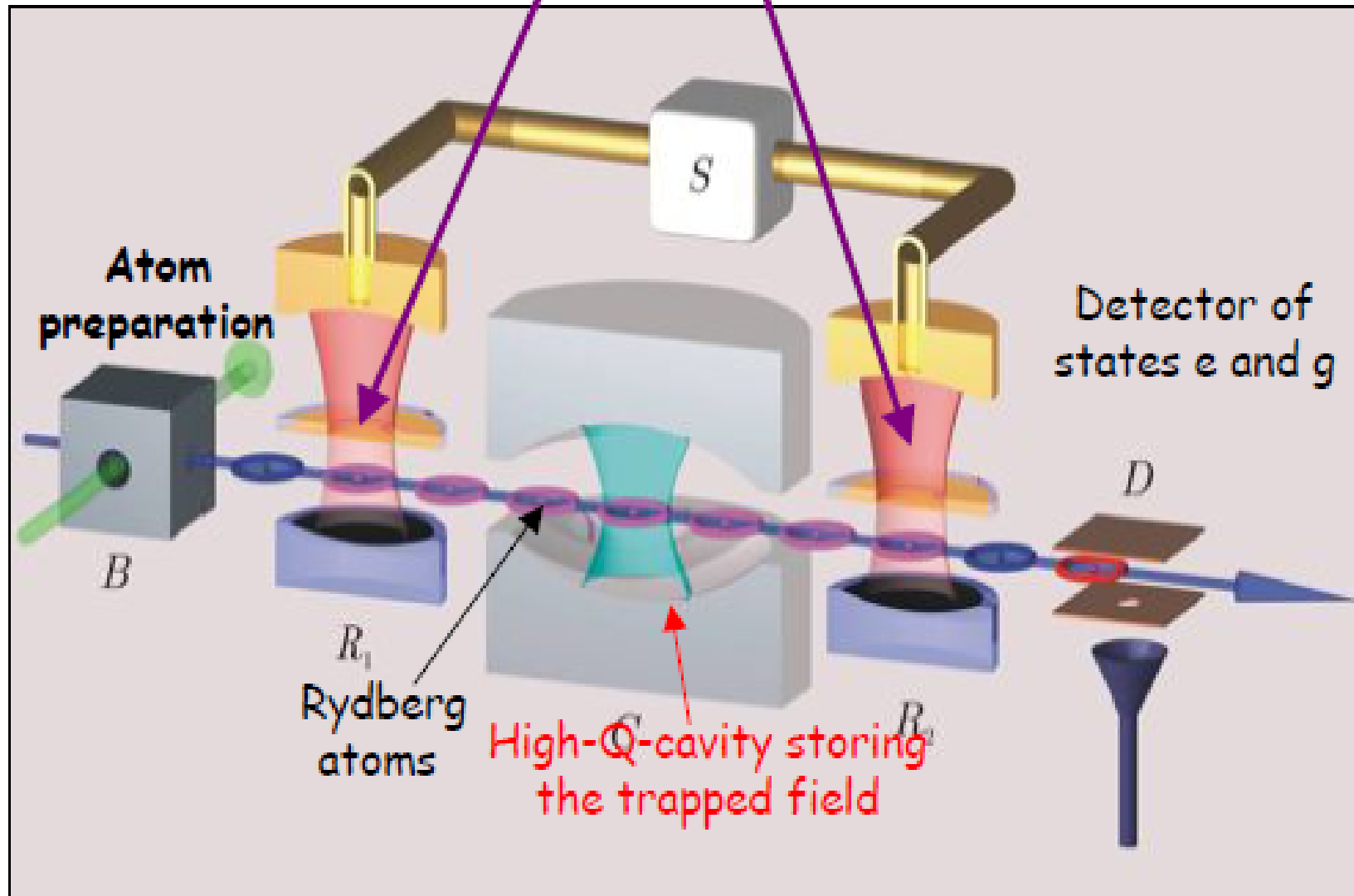
n = nombre de fotons

3. CAPTURA I MANIPULACIÓ DE FOTONS

3. CAPTURA I MANIPULACIÓ DE FOTONS INDIVIDUALS

► DISPOSITIU EXPERIMENTAL DEL GRUP DE S. HAROCHE

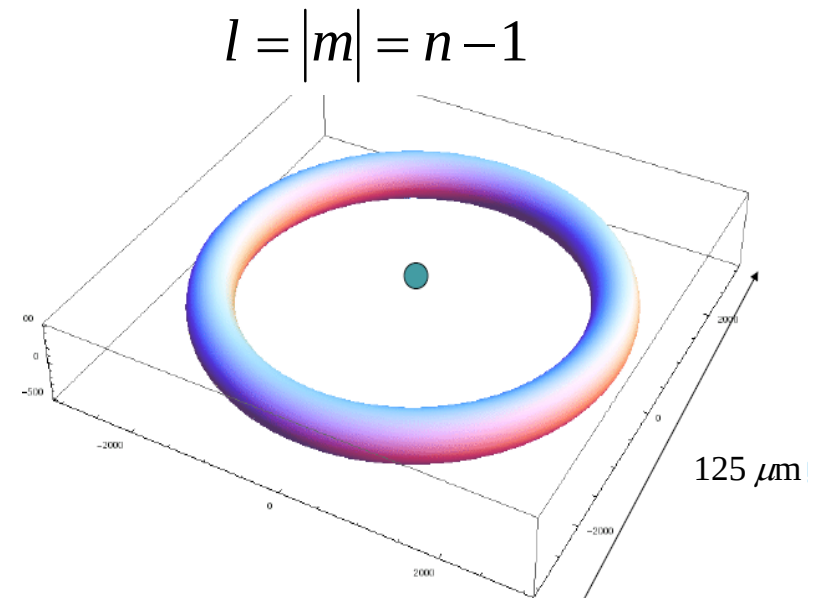
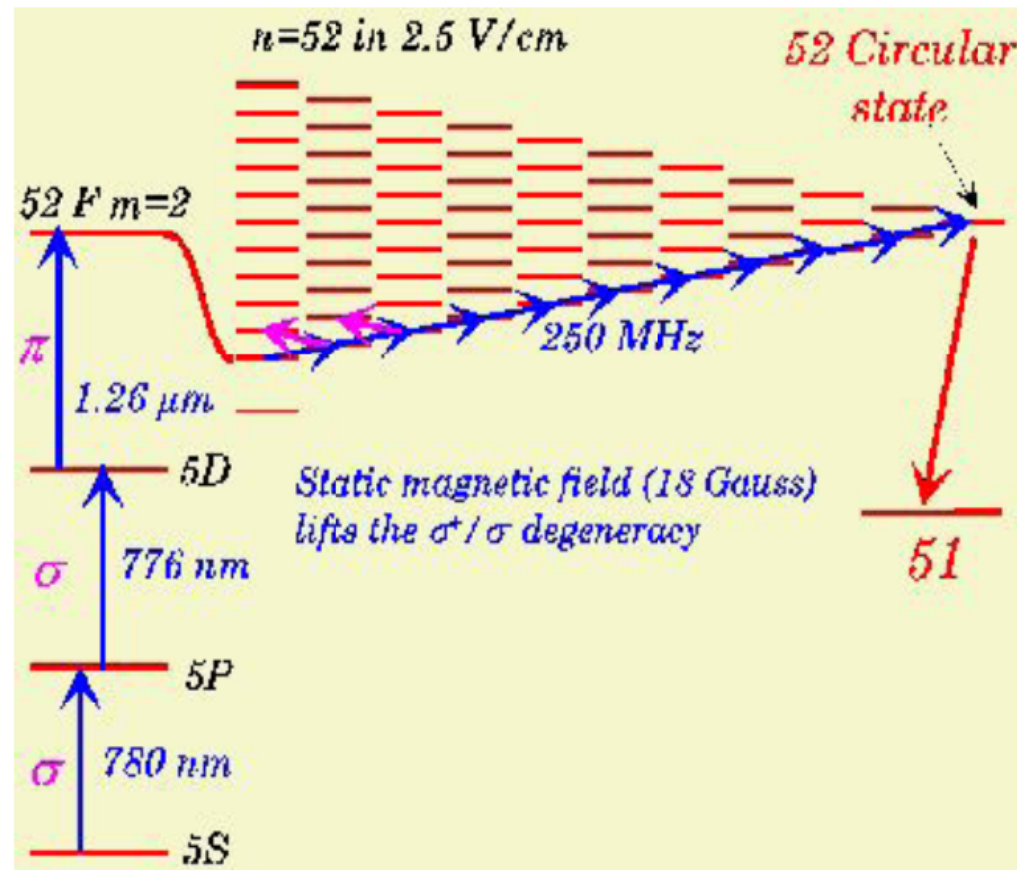
Microwave pulses preparing (left) the atomic qubit and rotating it (right) in the detection direction



3. CAPTURA I MANIPULACIÓ DE FOTONS INDIVIDUALS

► ATOMS DE RYDBERG

The path towards circular states: an adiabatic process involving 53 photons

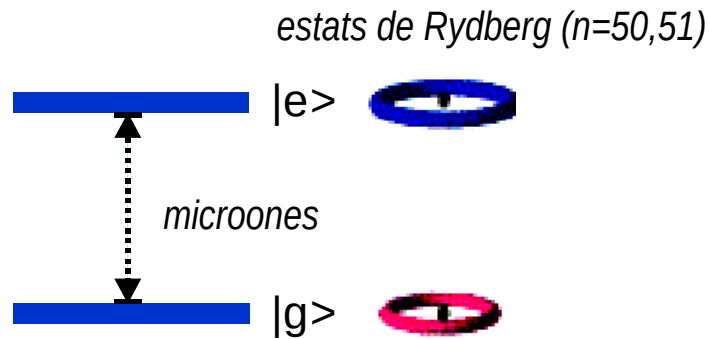


Dipol elèctric enorme !!!
Mil vegades més gran que $\mu_0 = ea_0$

3. CAPTURA I MANIPULACIÓ DE FOTONS INDIVIDUALS

► OSCIL·LACIONS DE RABI QUÀNTIQUES

◆ Àtom de dos nivells

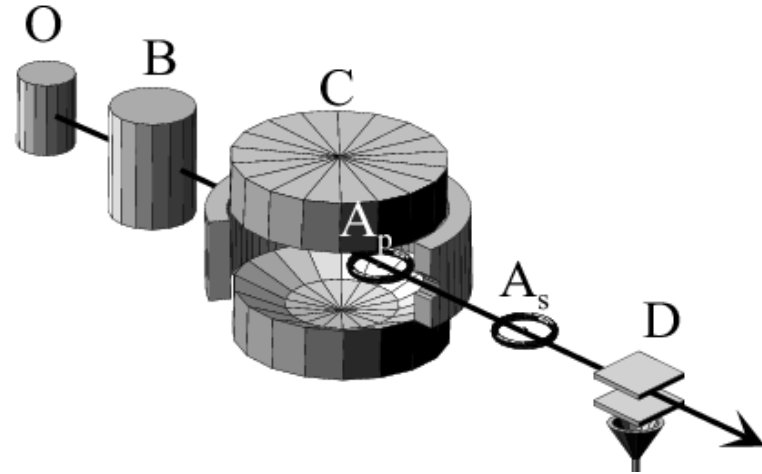


◆ Cavitat Fabry-Perot superconductora



Miralls esfèrics
de Niobium

◆ Dispositiu experimental



- Els millors miralls del món
- Un fotó pateix 1.5 bilions de reflexions
Equivalent a un recorregut de 40000 km

$$T_{\text{cav}} = 130 \text{ ms}$$

$$T = 1 \text{ mK}$$

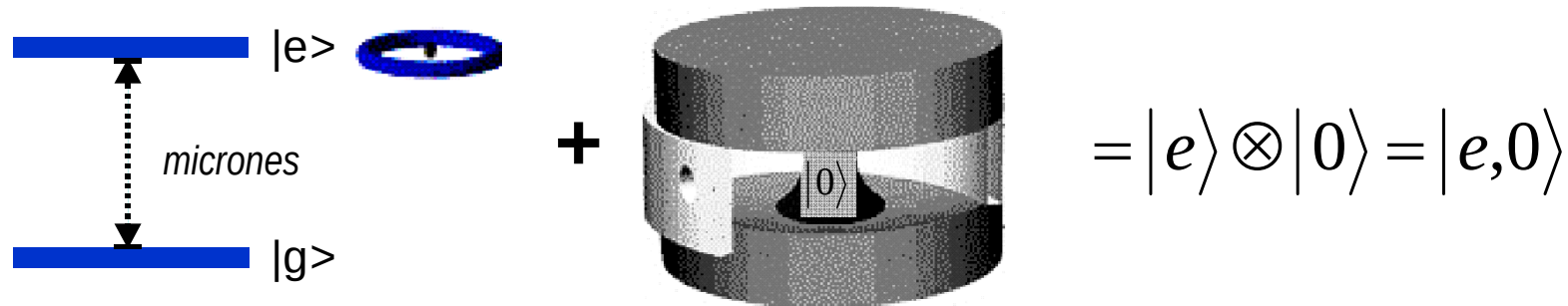
$$\langle N \rangle_{\text{thermal photons}} < 0.06$$

$$\nu = 51 \text{ GHz}$$

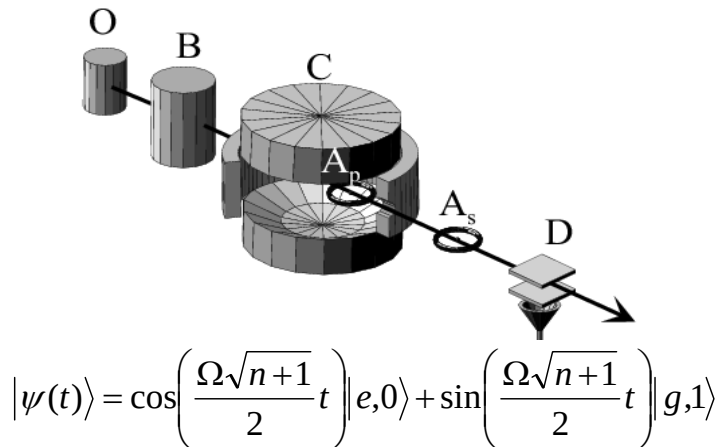
3. CAPTURA I MANIPULACIÓ DE FOTONS INDIVIDUALS

► OSCIL·LACIONS DE RABI QUÀNTIQUES

◆ Estat inicial del sistema:

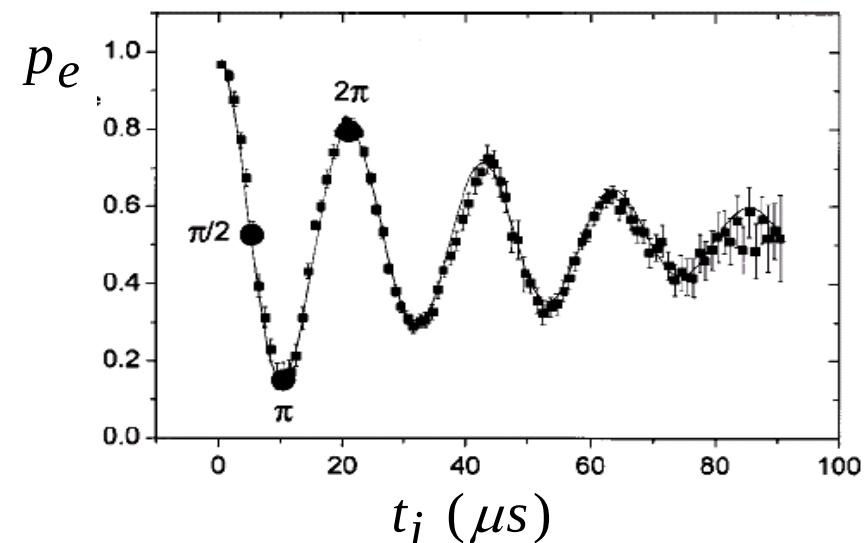


◆ L'estat final del sistema depèn del temps d'interacció:



$$\frac{\Omega}{2\pi} = 50 \text{ kHz}$$

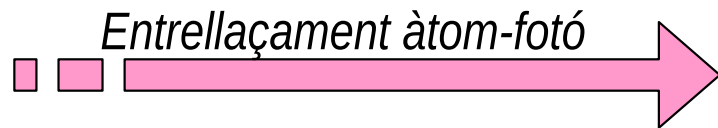
◆ *Oscil·lacions de Rabi del buit de fotons*



S. Haroche et al., Phys. Rev. Lett. 76, 1800 (1996)

3. CAPTURA I MANIPULACIÓ DE FOTONS INDIVIDUALS

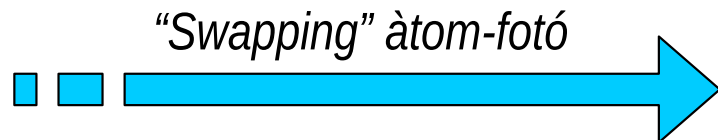
▶ ENTRELLAÇAMENT ÀTOM-FOTÓ AMB EL BUIT DE FOTONS



$$\Omega t = \pi/2$$
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ |e, 0\rangle + |g, 1\rangle \right\}$$

Hagley et al, Phys.Rev.lett. 79, 1 (1997).

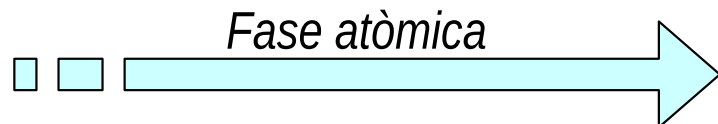
Atom - Photon entanglement
Non-local correlations between atom and cavity field (Einstein-Podolski-Rosen)



$$\Omega t = \pi$$
$$|e, 0\rangle \longrightarrow + |g, 1\rangle$$

Maitre et al, Phys.Rev.lett. 79, 769 (1997)

Excitation swapping between atom and field and "quantum" mapping



$$\Omega t = 2\pi$$
$$|e, 0\rangle \longrightarrow -|e, 0\rangle; |g, 1\rangle \longrightarrow -|g, 1\rangle$$

A.Rauschenbeutel et al, Phys.Rev.lett. 83, 5166, 1999
G.Nogues et al, Nature, 400, 239, 1999

Full cycle Rabi oscillation bringing back system to initial state, with a π phase shift of its wave function

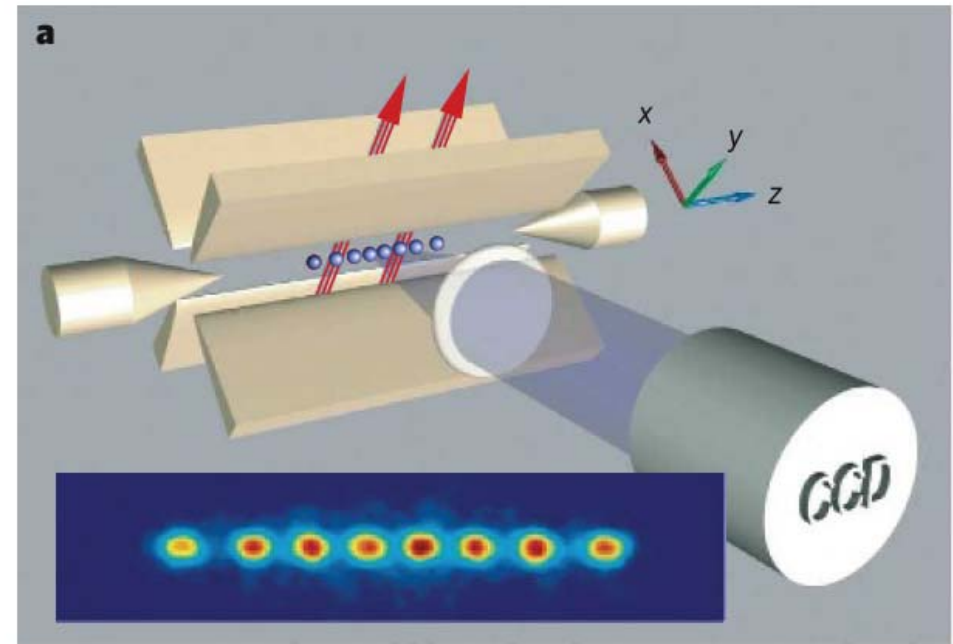
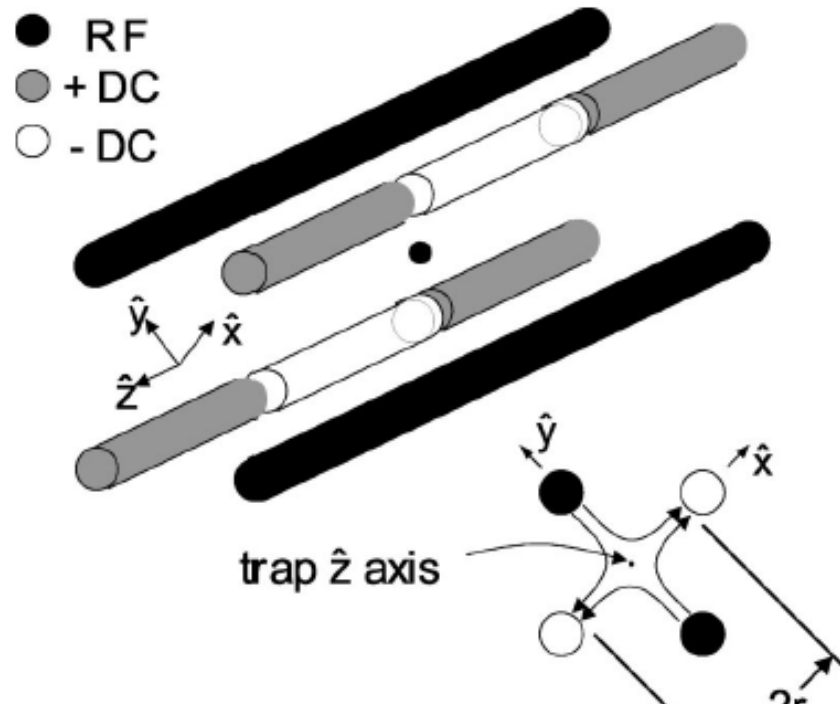
SERGE HAROCHE

- Increment de l'emissió espontània d'un àtom en una cavitat (*PRL 50, 1903, 1983*)
- Maser de dos fotons (*PRL 59, 1899, 1987*)
- "Quantum non-demolition measurements" per a un sol fotó (*PRA 45, 5193, 1992*)
- Teleportació d'estats atòmics entre dues cavitats (*PRA 50, R895, 1994*)
- Gat de Schrödinger entre un àtom i un estat coherent (*PRL 77, 4887, 1996*)
- Oscil·lacions de Rabi del buit de fotons i d'un estat coherent (*PRL 76, 1800, 1996*)
- Generació d'un parell EPR d'àtoms (*PRL 79, 1, 1997*)
- Entrellaçament atom-mode del camp e.m. (*Nature 400, 239, 1999*)
- Porta lògica quàntica de fase entre dos qubits (*PRL 83, 5166, 1999*)
- Observació d'un fotó sense destruir-lo (*Nature 400, 239, 1999*)
- Entrellaçament entre tres àtoms (*Science 288, 2024, 2000*)
- Salts quàntics de la llum. Naixement i mort d'un fotó (*Nature 446, 297, 2007*)

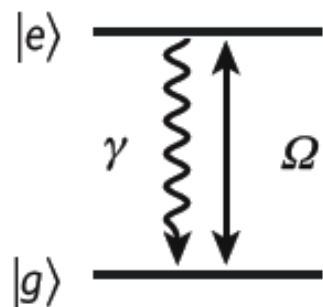
4. CAPTURA I MANIPULACIÓ D'IONS

4. CAPTURA I MANIPULACIÓ D'IONS INDIVIDUALS

▶ TRAMPA DE PAUL (TRAMPA QUADRIPOLEAR LINEAL)



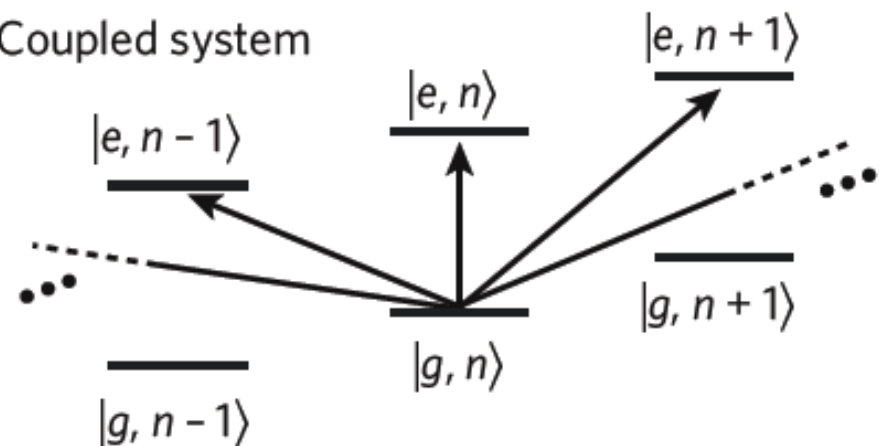
Two-level ion



Harmonic trap

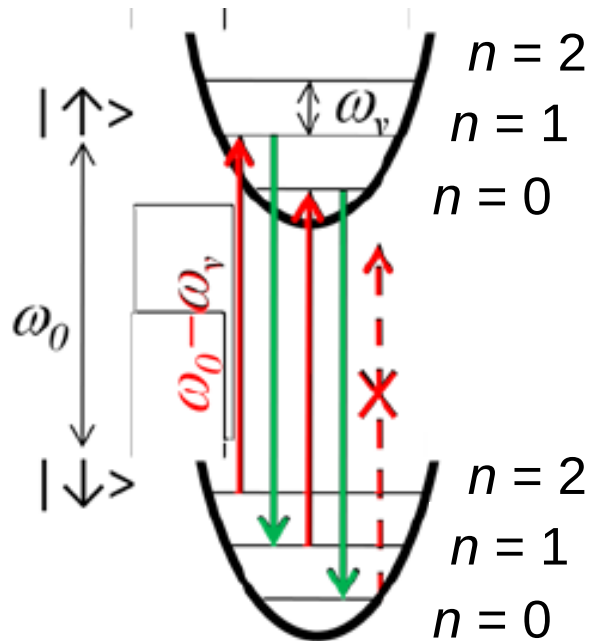


Coupled system

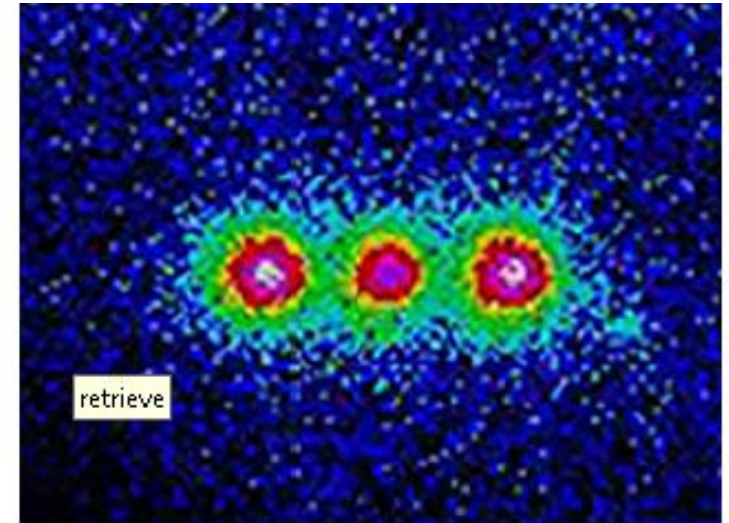


4. CAPTURA I MANIPULACIÓ D'IONS INDIVIDUALS

► SIDEBAND COOLING



Fluorescència de
tres ions de Be^+
(Wineland, NIST)



D. Wineland et al., Phys. Rev. Lett. 62, 403 (1989)

D. Wineland et al., Phys. Rev. Lett. 75, 4011 (1995)

Com refredar al nivell fonamental de la trampa:

Excitem l'ió augmentant la seva energia interna tot disminuint l'energia vibracional

Làser sintonitzat a la freqüència: $\omega_0 - \omega_n$ (transició Raman)

L'ió es desexcita preferentment cap a un estat amb el mateix n

Creació d'estats de Fock i d'estats coherents de moviment

► RELLOTGES ATÒMICS

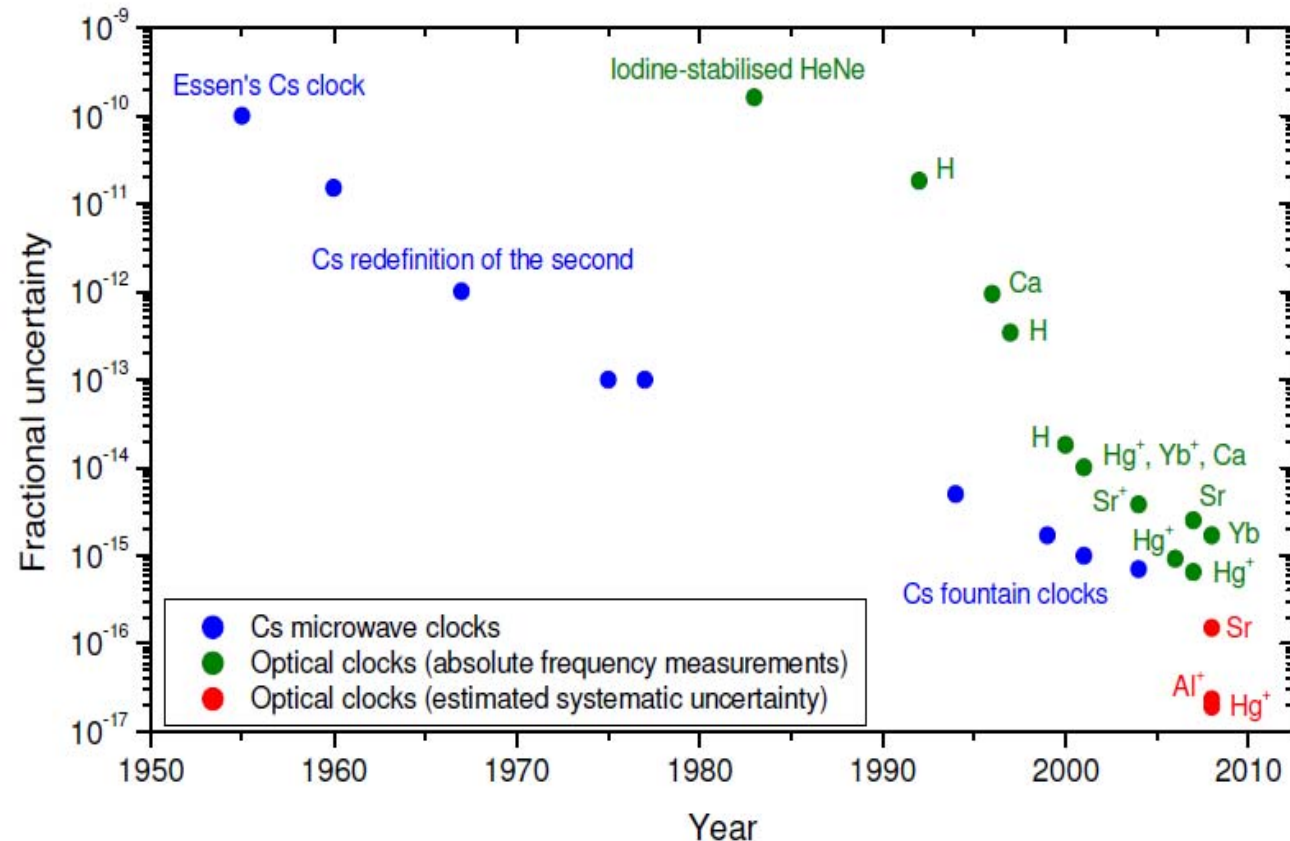
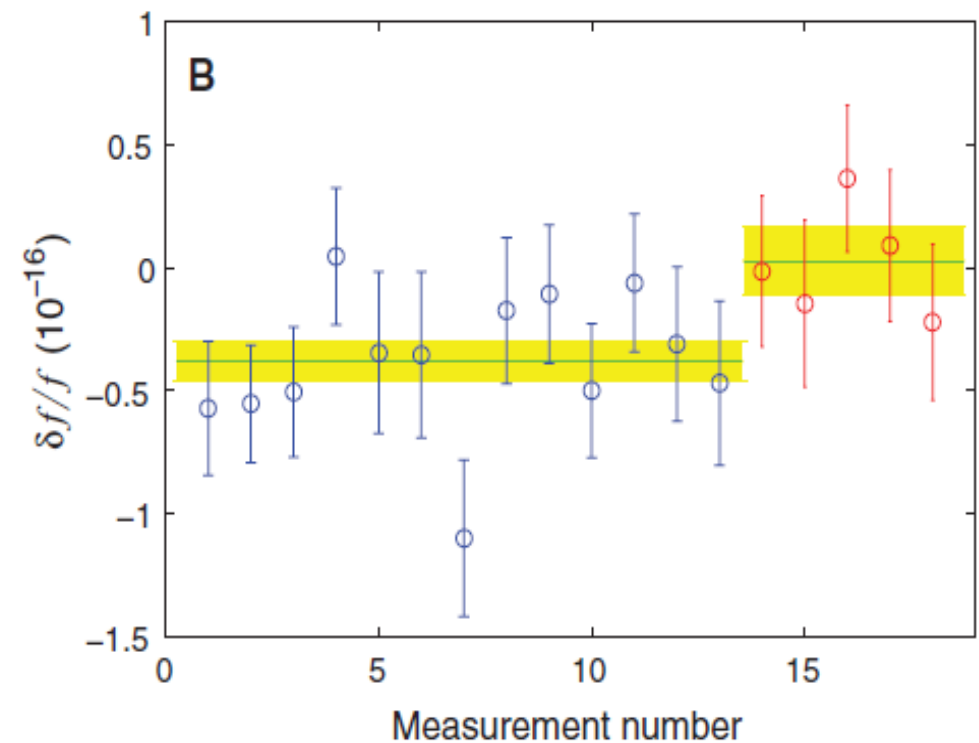
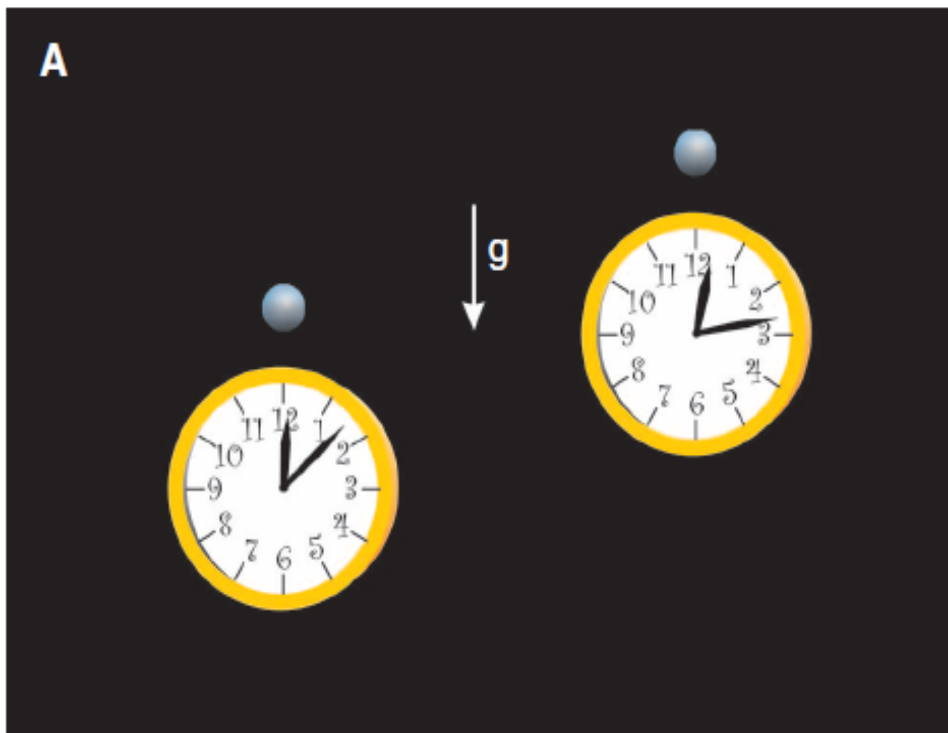


Figure 39. The accuracy of caesium microwave atomic clocks has increased by more than five orders of magnitude over the past 50 years (blue circles), and the best caesium fountain clocks now have systematic uncertainties better than 1 part in 10^{15} . However recent progress in the development of optical frequency standards has been even more rapid, with the uncertainties of the best absolute frequency measurements (green circles) now limited by the uncertainty of the caesium primary standards, and direct comparisons between optical frequency standards (red circles) showing an even higher level of reproducibility.

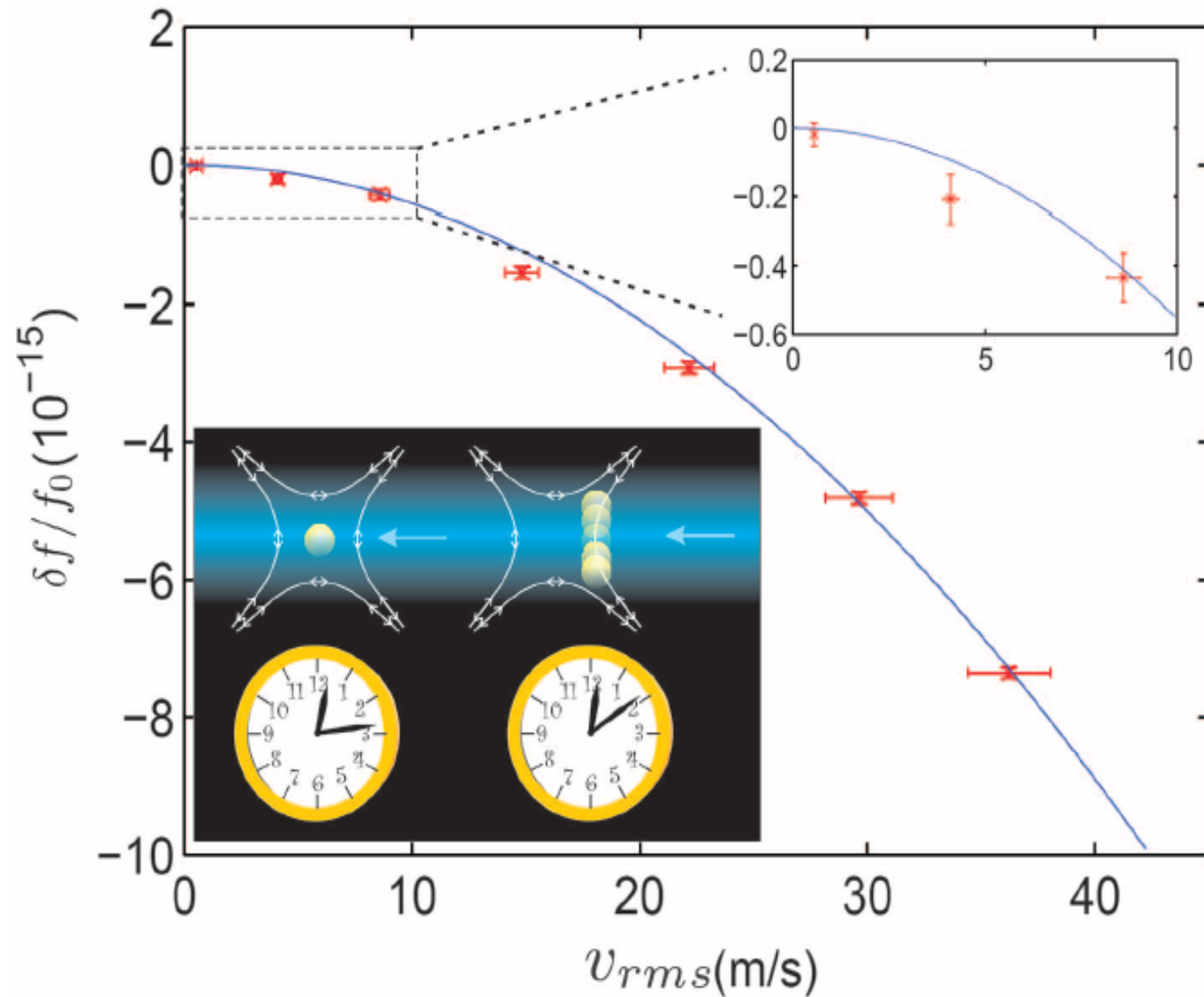
Optical Clocks and Relativity



Starting at data point 14 the height of one of the clocks was increased by 50 cm

Optical Clocks and Relativity

C.W. Chou et al, Science **329**, 1630 (2010)



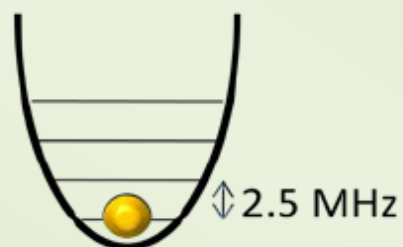
DAVID WINELAND

- Observació de salts quàntics amb un sol ió (*PRL* 57, 1699, 1986)
- Observació de l'efecte Zeno quàntic (*PRA* 41, 2295, 1990)
- Generació d'estats comprimits ("squeezed atomic states") (*PRA* 50, 67, 1994)
- Porta lògica CNOT entre dos ions (*PRL* 75, 4714, 1995)
- Gat de Schrödinger amb els estats vibracionals d'un ió (*Science* 272, 1131, 1996)
- Entrellaçament entre dos ions (*PRL* 87, 3634, 1998)
- Observació dels estats de moviment quàntics d'un sol ió (*PRL* 77, 4281, 1998)
- Entrellaçament entre quatre ions (*Nature* 404, 256, 2000)
- Violació de les desigualtats de Bell (*Nature* 409, 791, 2001)
- Proposta de computador quàntic escalable amb ions (*Nature* 417, 709, 2002)
- Porta lògica de fase entre dos ions (*Nature* 422, 412, 2003)
- Teleportació quàntica de qubits atòmics (*Nature* 429, 737, 2004)
- Gat de Schrödinger amb sis ions (*Nature* 438, 639, 2005)
- Relotge atòmic òptic (*Science* **28**, 1808, 2008)

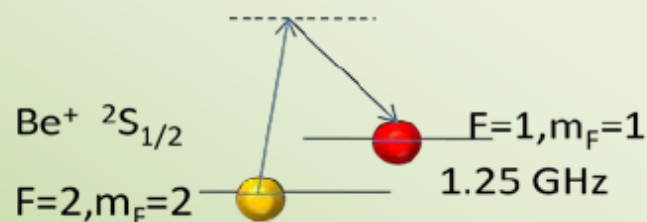
5. CONCLUSIONS

Control of individual quantum systems

Ion in a trap



D. Wineland



Photon in a cavity



$$Q = 4 \times 10^{10}$$

$$T_c = 130 \text{ ms}$$

S. Haroche

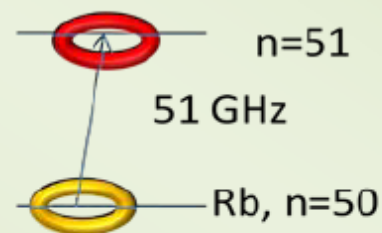


Fig. 1: Illustration of the two types of experiments discussed in this scientific background: On the left, an ion is captured in a harmonic trap. Its quantum state (both its internal state and its motion) is controlled by interaction with laser pulses as exemplified for the case of Be^+ . On the right, a photon is (or several photons are) trapped in a high- Q microwave cavity. The field state is measured and controlled by interaction with highly excited Rb atoms.

5. CONCLUSIONS

- ✓ Estem a l'inici de l'anomenada “**SEGONA REVOLUCIÓ QUÀNTICA**”
- ✓ **Preparació de sistemes quàntics individuals en estats entrellaçats.**
Aplicacions en:

Mesures de precisió

Nous rellotges atòmics

Simulació quàntica

Comunicació quàntica

Computació quàntica

- ✓ Articles de revisió:

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 73, JULY 2001

Colloquium: Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity

J. M. Raimond, M. Brune, and S. Haroche

Laboratoire Kastler Brossel, Département de Physique de l'Ecole normale supérieure, 24 rue Lhomond, F-75231, France*

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 75, JANUARY 2003

Quantum dynamics of single trapped ions

D. Leibfried

University of Colorado and National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80305-3328

R. Blatt

Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, A-6020 Innsbruck, Austria

C. Monroe

FOCUS Center and Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109-1120

D. Wineland

National Institute of Standards and Technology, Boulder, Colorado 80305-3328