Confeccionando una interacción entre fotones

Dr. Asaf Paris Mandoki

https://asaf.pm/divulgacion

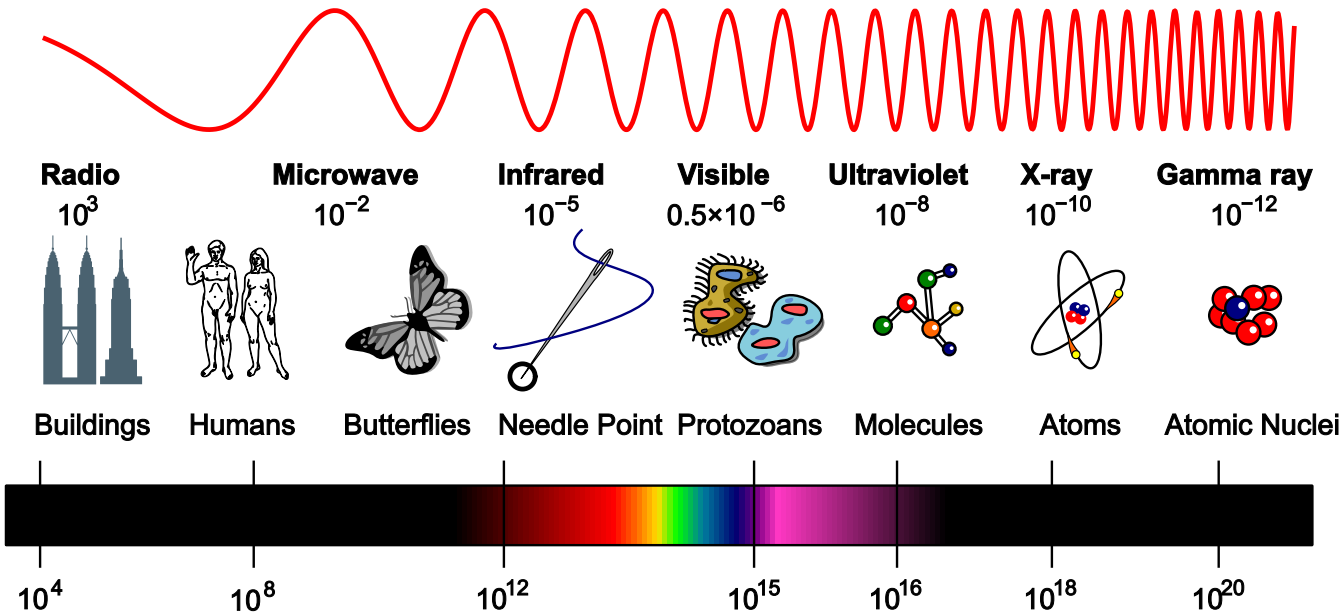
Instituto de Física
UNAM

LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIA CUÁNTICA

La luz

La luz

Clásicamente: onda electromagnética

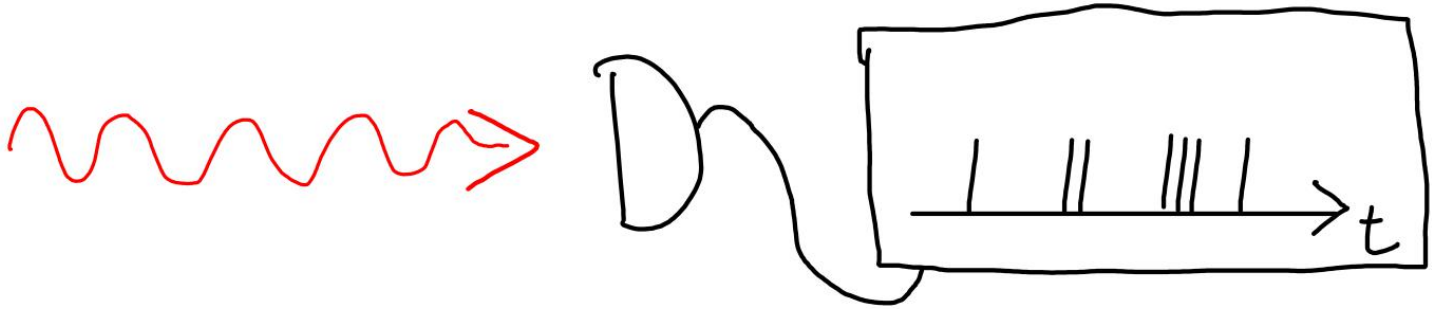


Crédito: Inductiveload/Wikipedia bajo CC

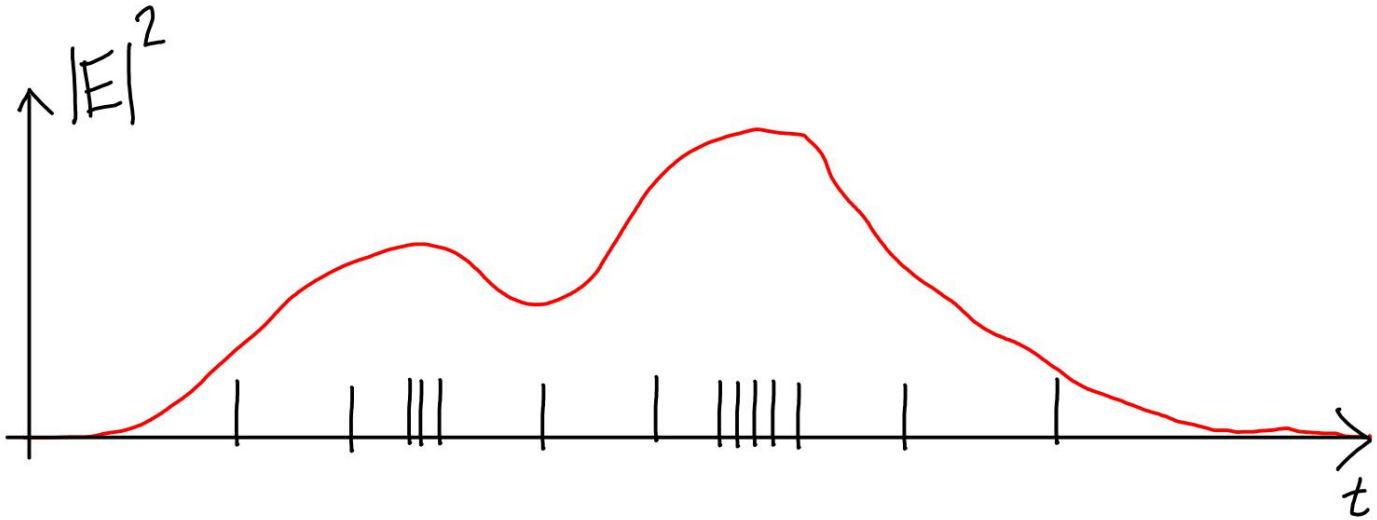
$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\vec{E}(\vec{x},t) = 0 \qquad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\vec{B}(\vec{x},t) = 0$$

La luz

Cuánticamente: fotones



La onda electromagnética describe la distribución de probabilidad de detectar fotones.



¿Por qué no es trivial hablar de interacción de luz?

Electrodinámica clásica en el vacío

Propiedad de superposición

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\vec{E}(\vec{x},t) \;=\; 0$$

Si $\vec{E}_1(\vec{x},t)$ y $\vec{E}_2(\vec{x},t)$ son soluciones de esta ecuación entonces

$$\vec{E}(\vec{x},t) = \vec{E}_1(\vec{x},t) + \vec{E}_2(\vec{x},t)$$

también es solución.

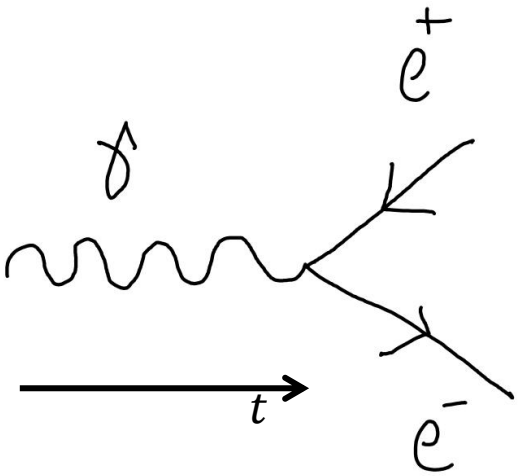
¿Qué significa esto para la interacción entre fotones en el vacío?

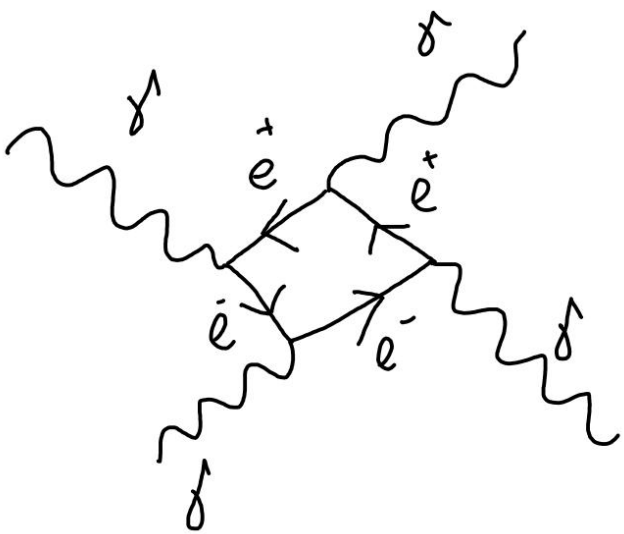
Superposición de luz

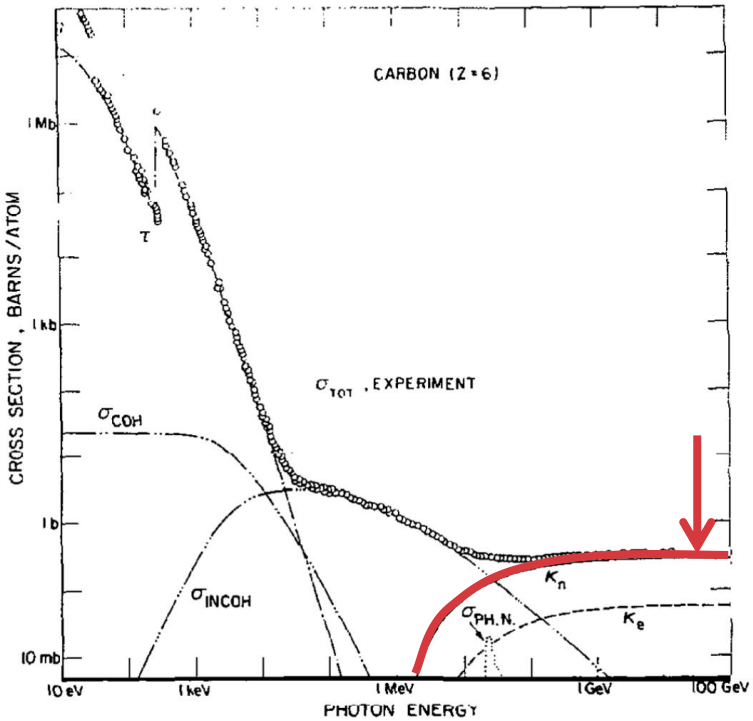
Interferencia ≠ Interacción

Superposición de luz

Producción de pares







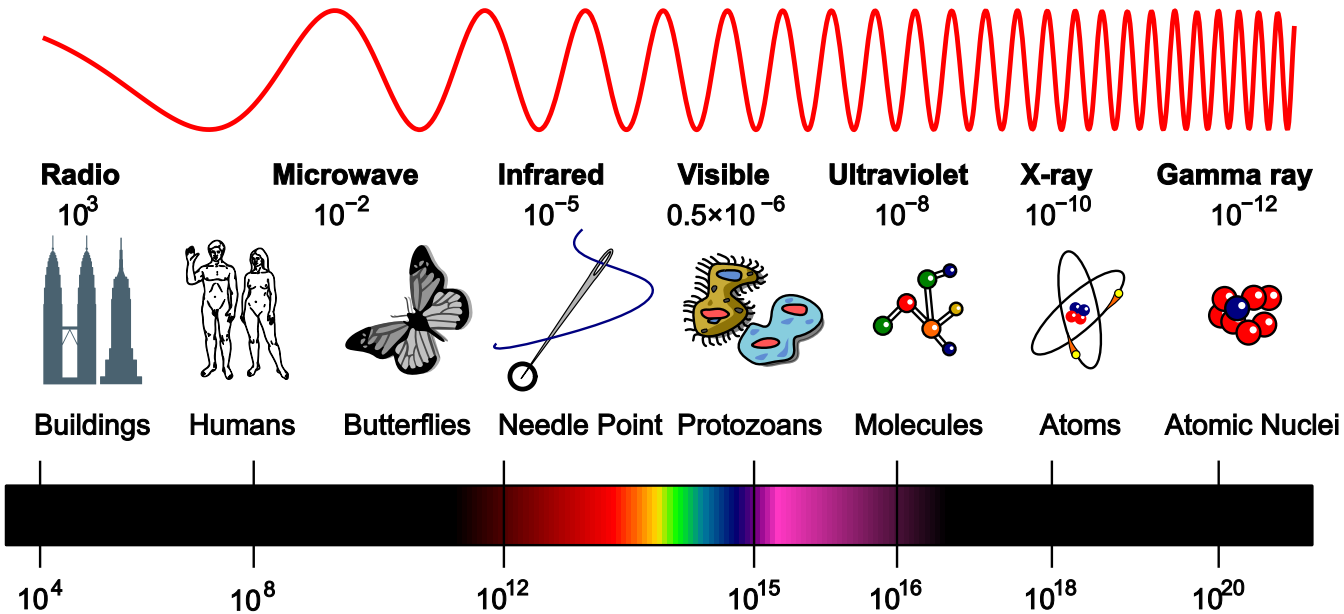
$$E_\gamma > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$

$$\lambda = 10^{-3}\text{nm}$$

Hubbell, Gimm, Øverø, J. of Phys. and Chem. Ref. D. 9, 1023 (1980); https://doi.org/10.1063/1.555629

La luz

Clásicamente: onda electromagnética

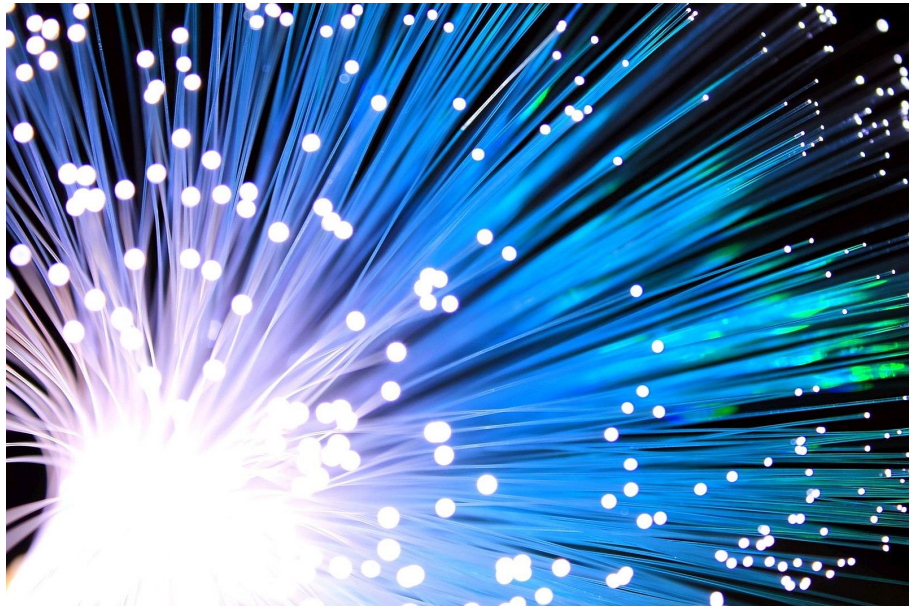


Crédito: Inductiveload/Wikipedia bajo CC

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\vec{E}(\vec{x},t) = 0 \qquad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\vec{B}(\vec{x},t) = 0$$

¿Por qué hacer a la luz interactuar?

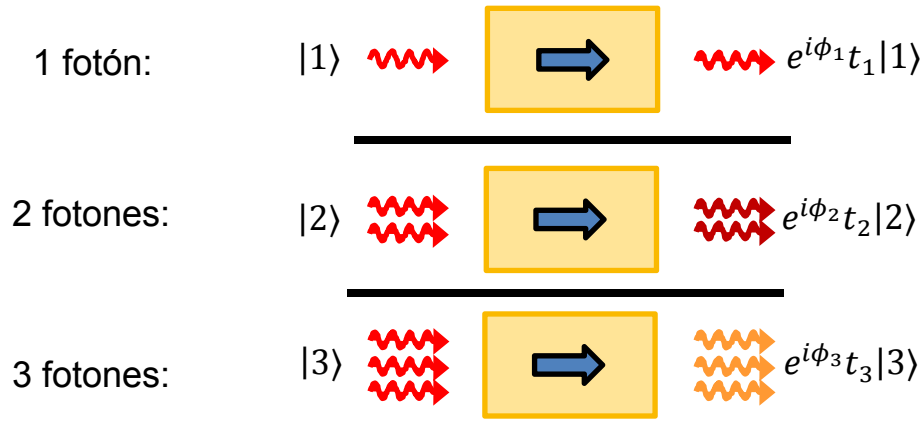
- La no interacción de la luz la hace un excelente medio de transmisión de inforamción pero hace difícil su procesamiento.
- Lograr que la luz interactúe a nivel de fotones individuales es una vía para lograr procesamiento de información cuántica.
- ¿Por qué no?



Fuente: Wikipedia por chaitawat / CC

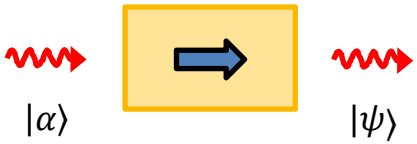
Qué significa una interacción entre fotones individuales

interacción efectiva entre
fotones individuales



la respuesta óptica del medio depende del
número exacto de fotones incidentes

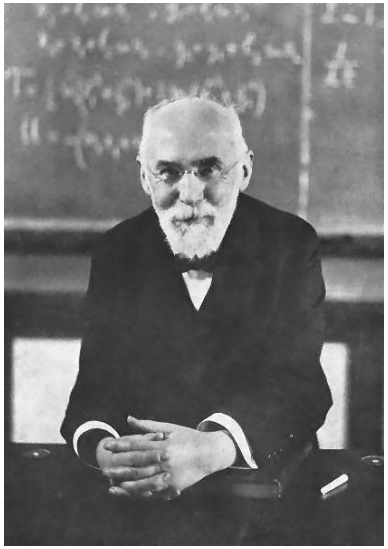
→ controlar
fotones individuales



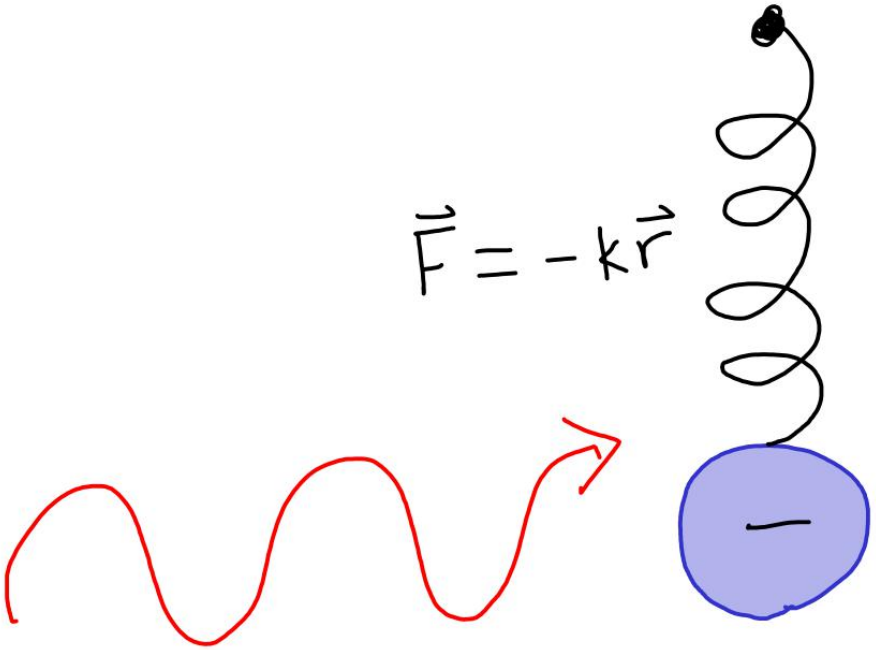
Luz en medios materiales

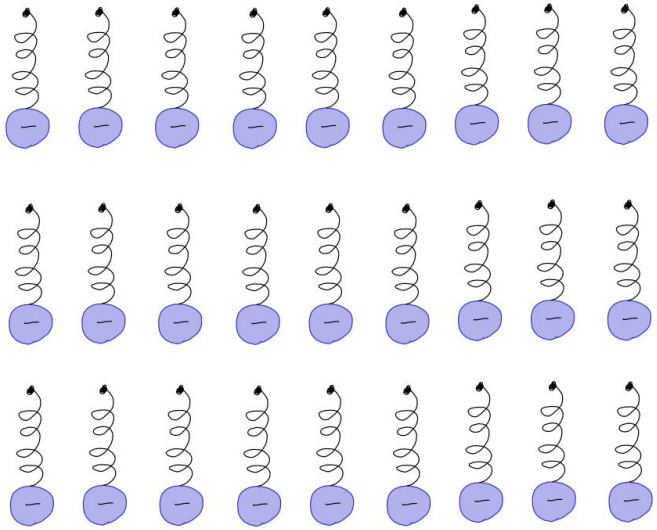
Modelo de Lorentz

- Nos ayuda a entender la relación de propiedades microscópicas (como *k*) con propiedades macroscópicas como el índice de refracción del medio.

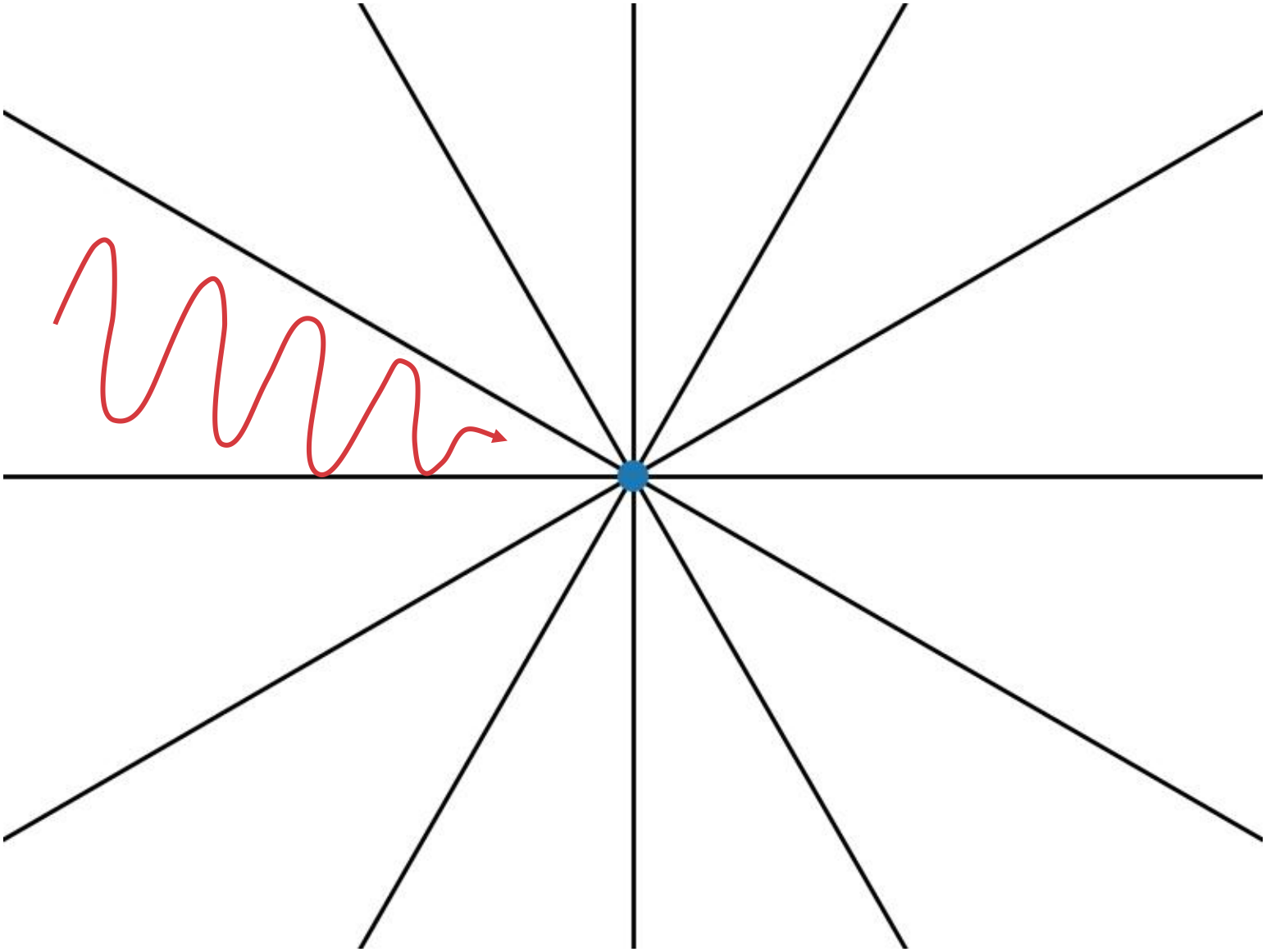


Hendrik Antoon Lorentz
Fuente: Wikipedia

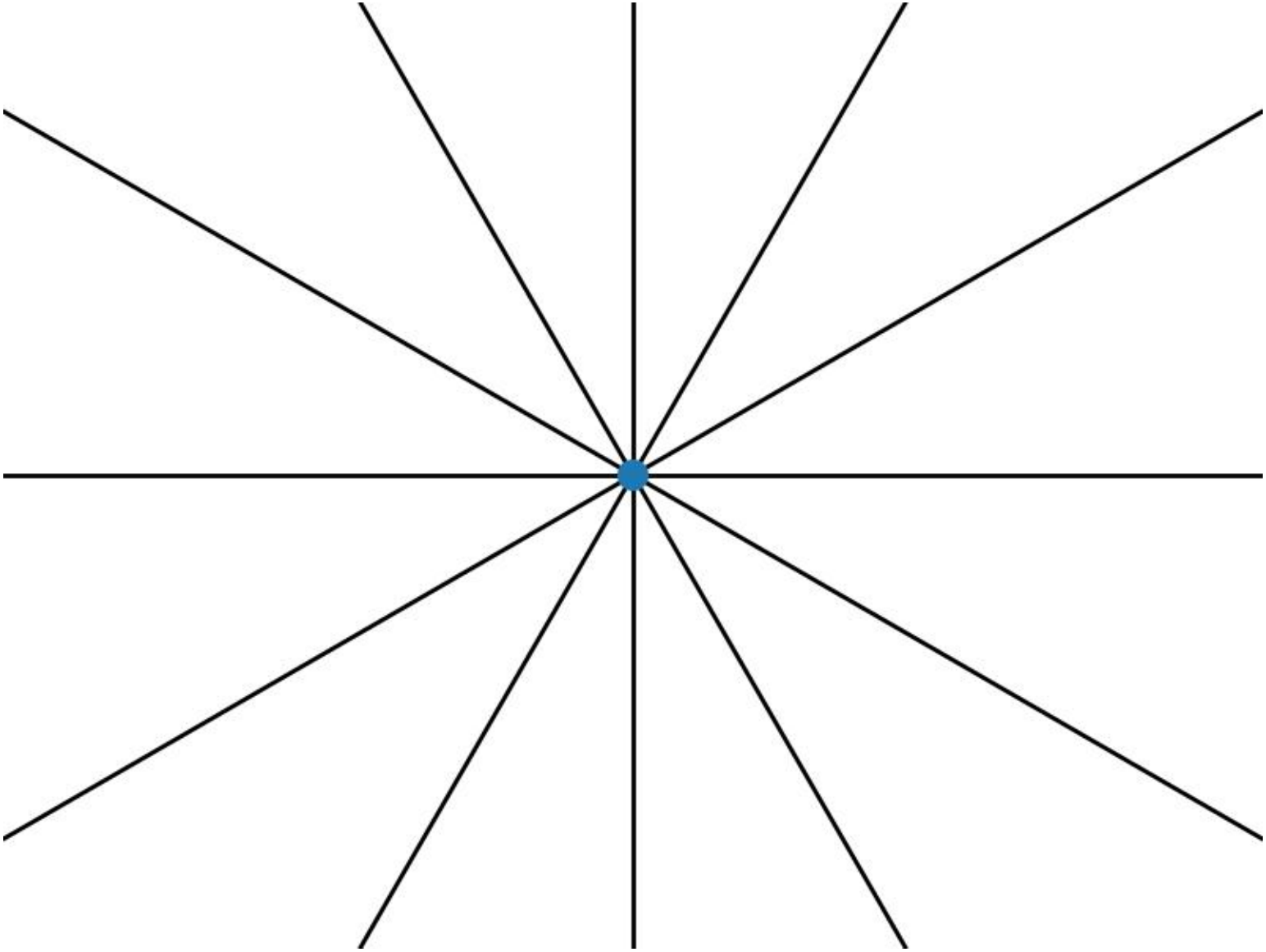




Medios lineales



Medios lineales



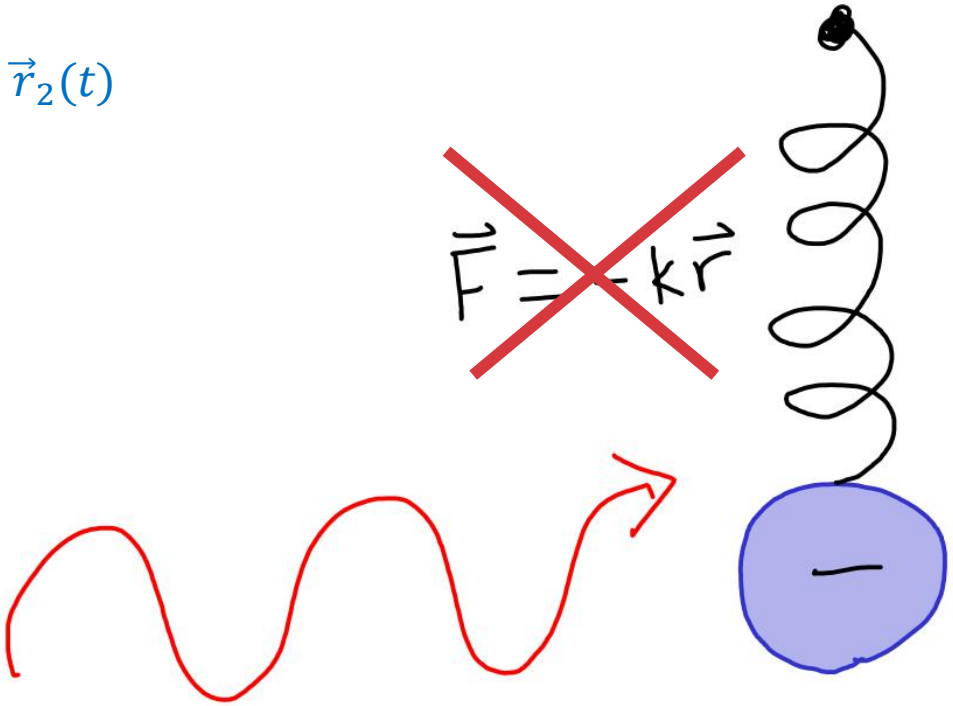
Medios lineales

$$\left(\frac{d^2}{dt^2} + \gamma \frac{d}{dt} + \omega_0^2\right)\vec{r}(t) = 0$$

Si $\vec{r}_1(t)$ y $\vec{r}_2(t)$ son soluciones de esta ecuación entonces

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_1(t) + \vec{r}_2(t)$$

también es solución.

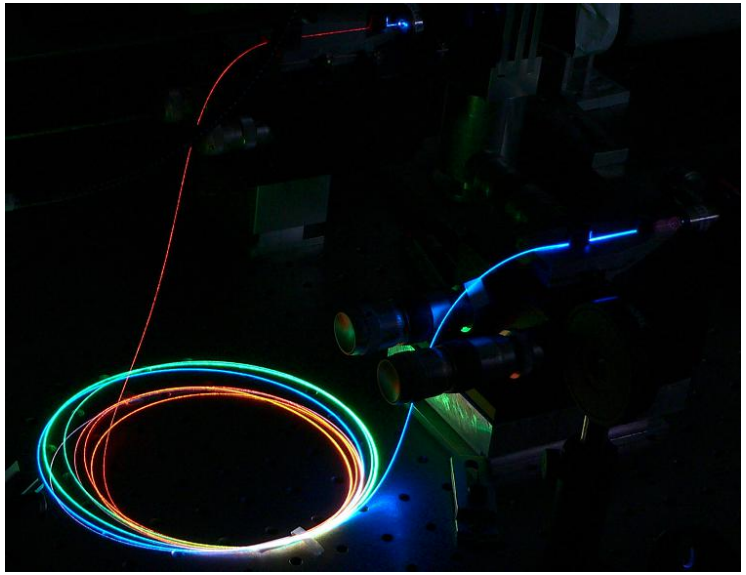


Necesitamos que el electrón no esté ligado mediante un resorte "hookeano"

Óptica no lineal

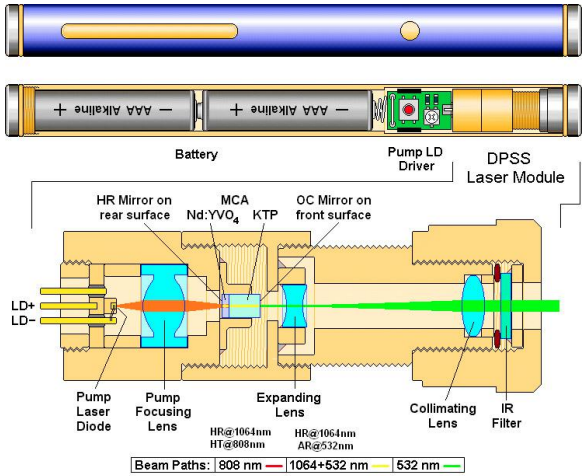
Aplicaciones de la óptica no lineal

Generación de supercontinuo



Wikipedia, por Blinking Spirit / CC

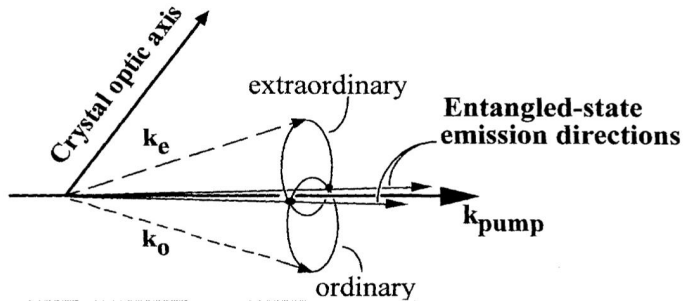
Duplicación de frecuencia de luz



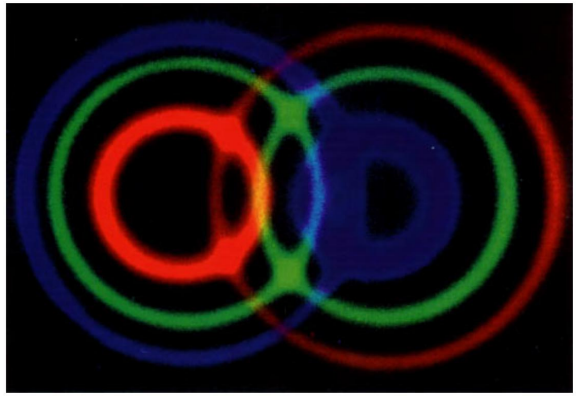
Typical Green DPSS Laser Pointer Using MCA

The dangerous dark companion of bright green lasers
https://doi.org/10.1117/2.1201012.003328

Producción de fotones enredados

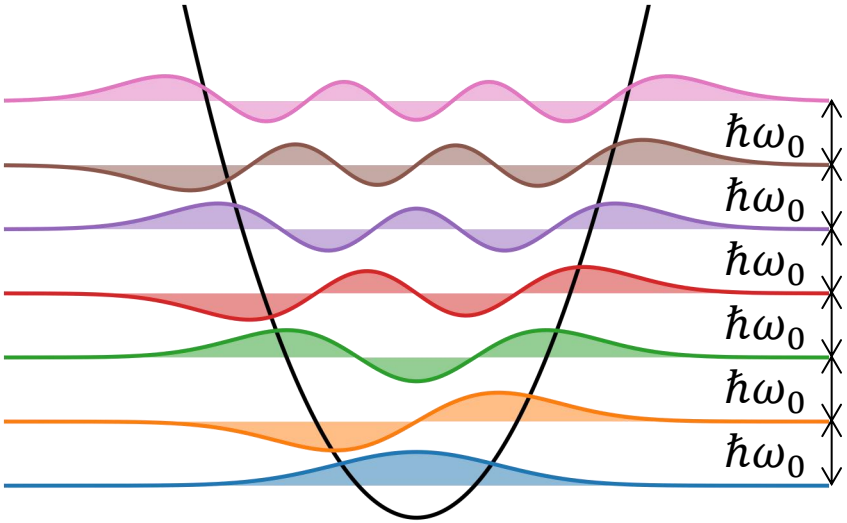


New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs
https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.4337



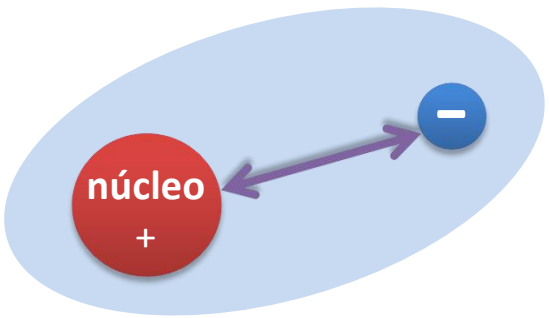
Experiment and the foundations of quantum physics
https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.S288

Osciladores cuánticos

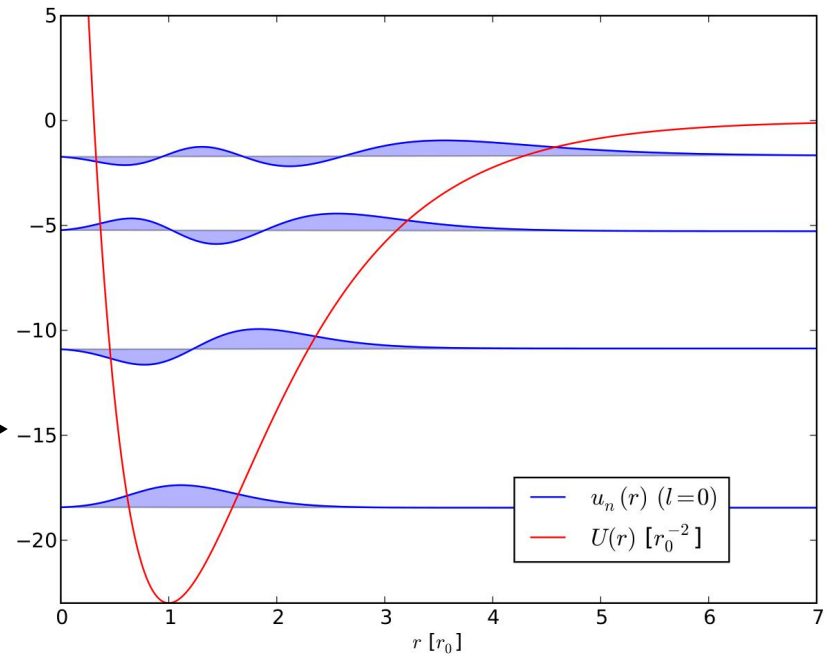


El oscilador armónico tiene niveles de energía equidistantes.

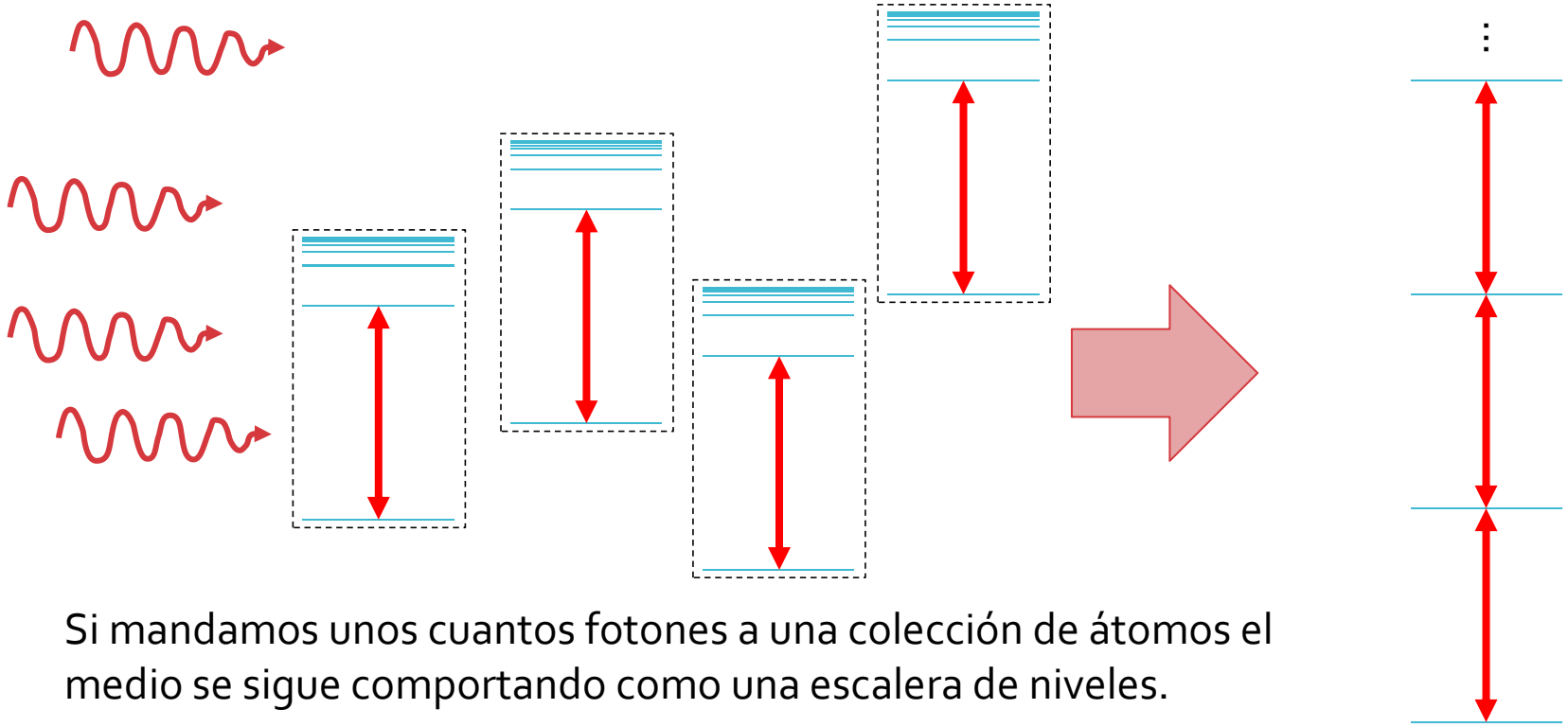
Para obtener efectos no lineales necesitamos un sistema que no tenga infinitos niveles equidistantes



Niveles de energía y funciones de onda para el electrón en un potencial atómico efectivo



Átomos como medios no lineales



Si mandamos unos cuantos fotones a una colección de átomos el medio se sigue comportando como una escalera de niveles.

En este caso se requieren de **altas intensidades** para saturar el medio y alcanzar el régimen no lineal.

1 mW rojo ≈ 10^{15} fotones/s

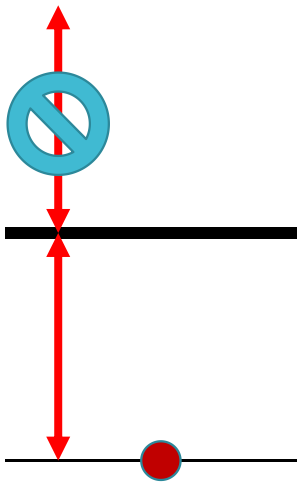
En medios convencionales la no linealidad es 20 órdenes de magnitud menor que lo necesario para observar efectos de fotones individuales

Óptica no lineal

AHORA CON UNOS CUANTOS FOTONES

¿Cómo lograr la no linealidad a con unos cuantos fotones?

Átomos individuales son medios no lineales

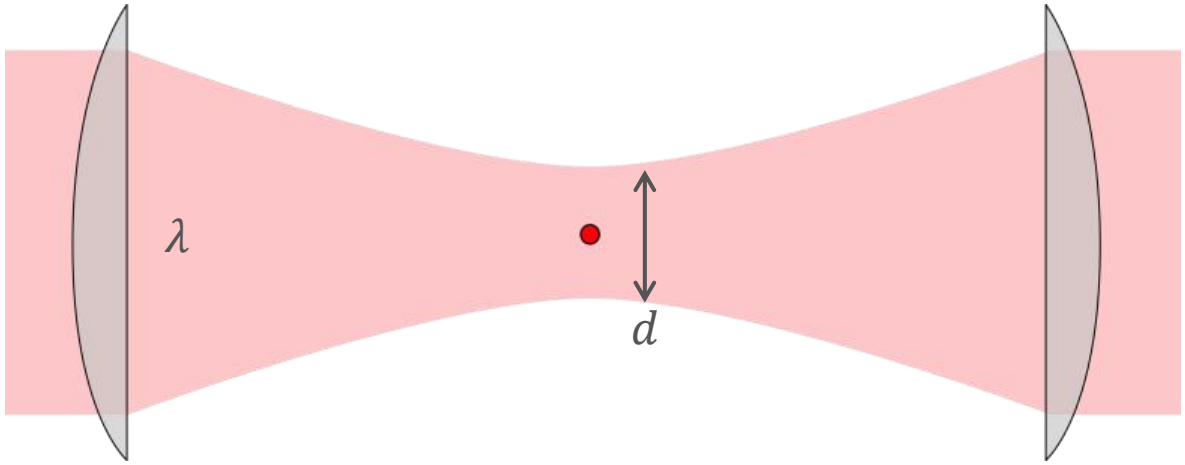


Probabilidad de interacción átomo-luz:

sección eficaz de interacción

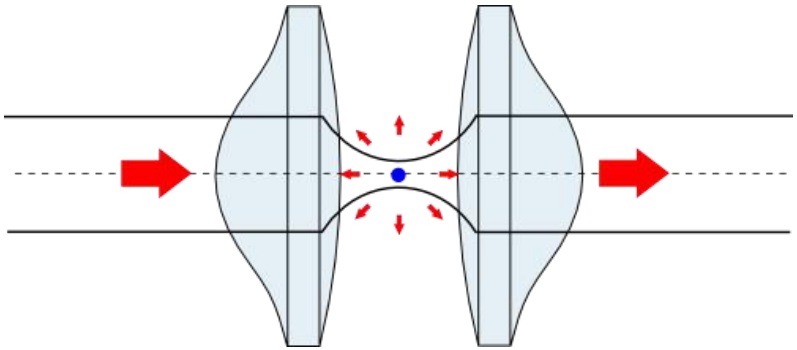
$$p \approx \sigma/d^2 \approx \lambda^2/d^2 \ll 1$$

por límite de difracción d > λ



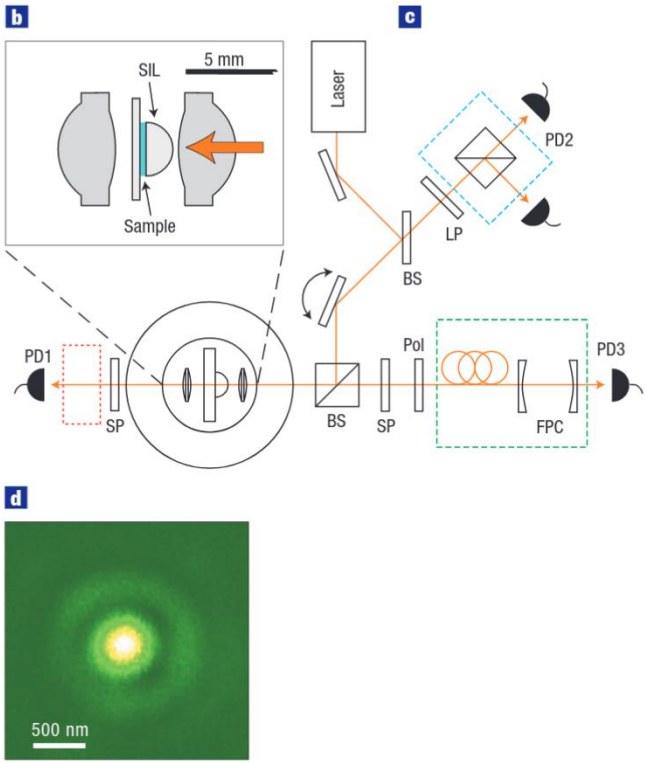
Emisores individuales en espacio libre

átomo individual $p \approx 0.36$



Christian Kurtsiefer , CQT Singapur
http://www.qolah.org/research/if2/interface.html
doi: 10.1038/s41467-017-01495-3

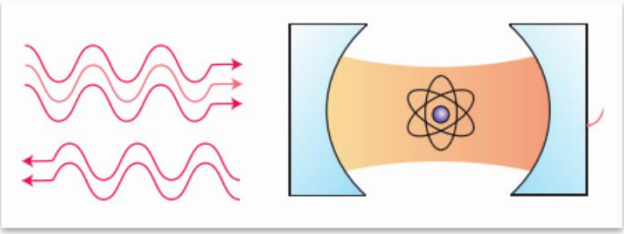
molécula individual $p \approx 0.1$



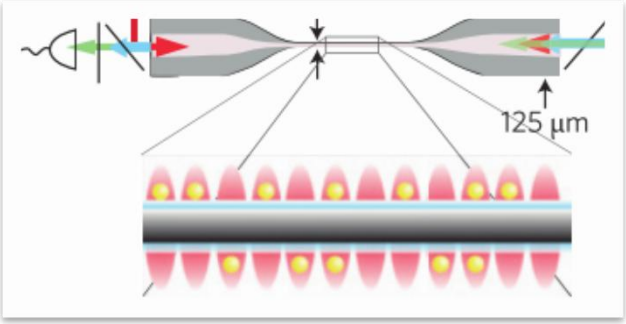
Sandoghdar, ETH Zurich
Efficient coupling of photons to a single molecule and the observation of its resonance fluorescence
doi: 10.1038/nphys812

¿Cómo lograr la no linealidad a con unos cuantos fotones?

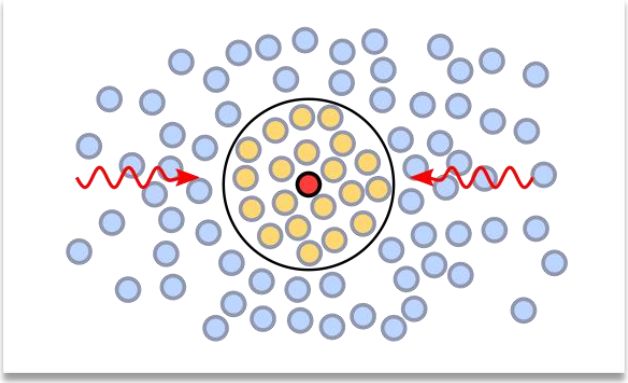
cavidades / resonadores ópticos

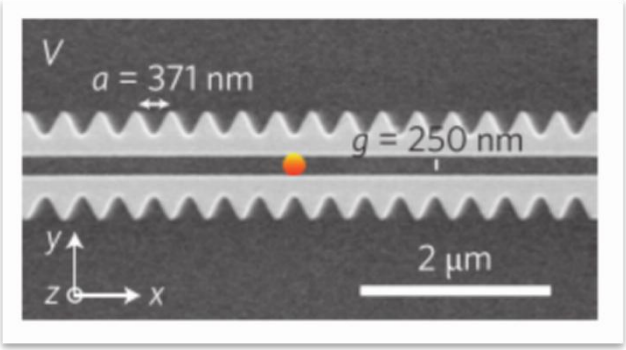


guías de onda



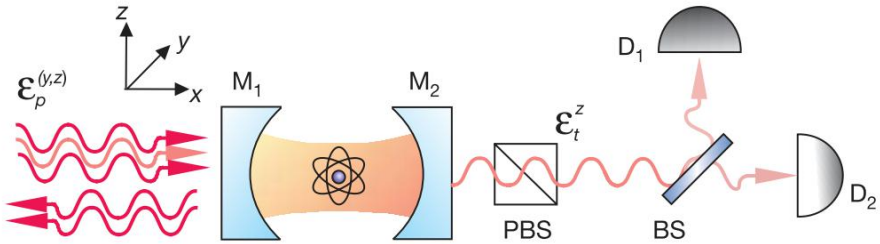
átomos de Rydberg

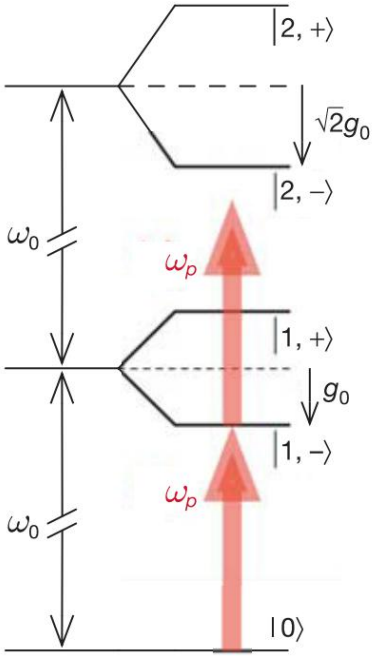




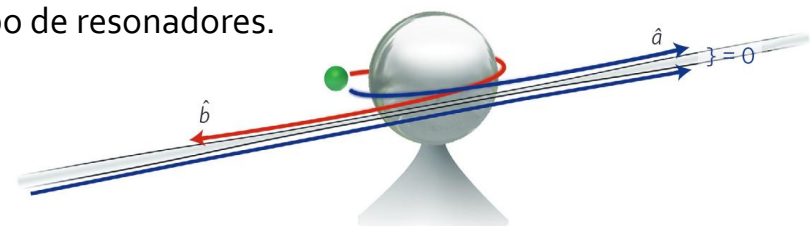
Chang, D. E., et. al. *Nat. Photon.*, 8(9), 685–694 (2014).
doi: 10.1038/nphoton.2014.192

Óptica no lineal cuántica con resonadores ópticos y un átomo





- El ir y venir de la luz dentro de la cavidad amplifica el acoplamiento entre átomo y luz.
- Cavidad se comporta como un oscilador armónico cuántico. Al acoplar la cavidad con un átomo se obtiene una respuesta no lineal.
- También posible con "átomos artificiales" u otro tipo de resonadores.



B. Dayan, doi: 10.1038/nphoton.2015.227

- Modelo de Jaynes-Cummings $\longrightarrow$

$$H = \underbrace{\hbar\omega\,\sigma^+\sigma}_{H_{átomo}} + \underbrace{\hbar\omega_0 a^+ a}_{H_{luz}} + \underbrace{\hbar g_0\left(\sigma^+ a + \sigma a^+\right)}_{H_{interacción}}$$

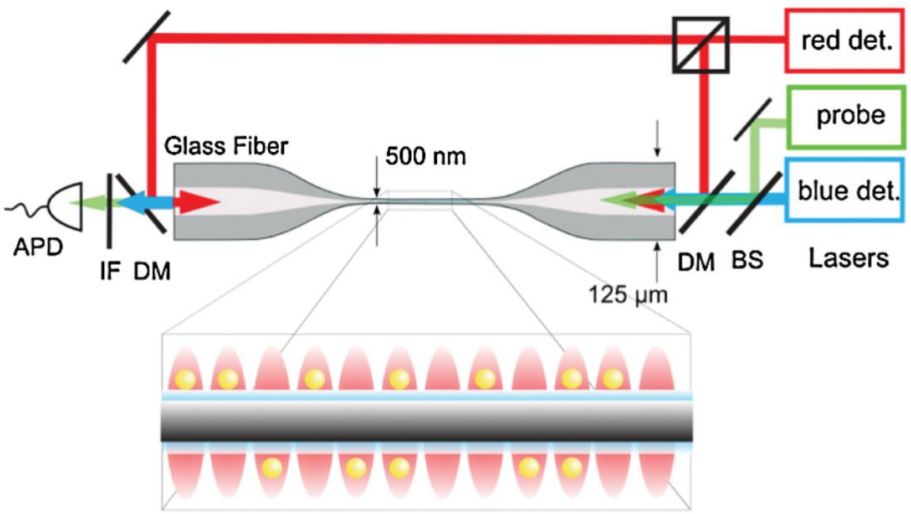
resonancia atómica

resonancia de cavidad

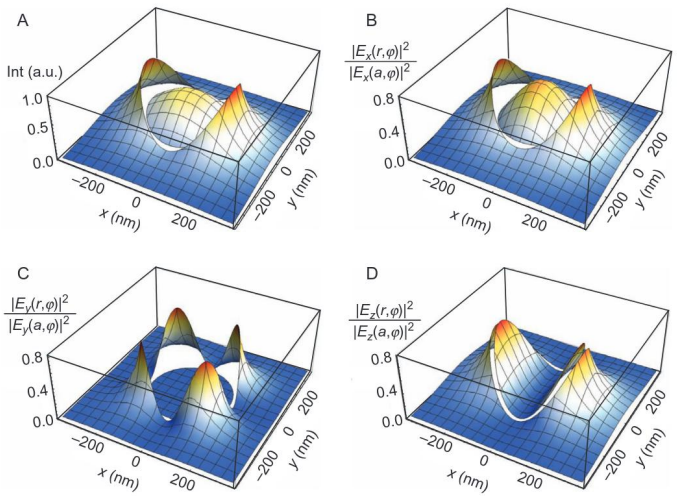
$\sigma = |b\rangle\langle e|$

doi:10.1038/nature03804

Guías de ondas

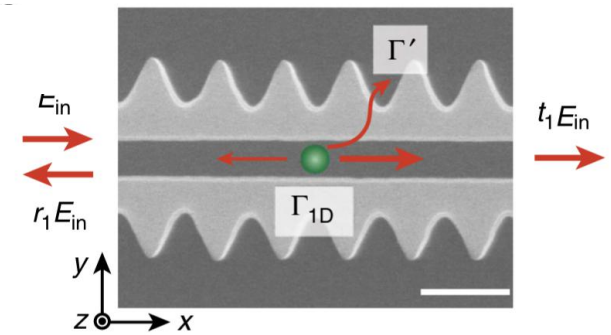


Rauschenbeutel doi: 10.1103/PhysRevLett.104.203603

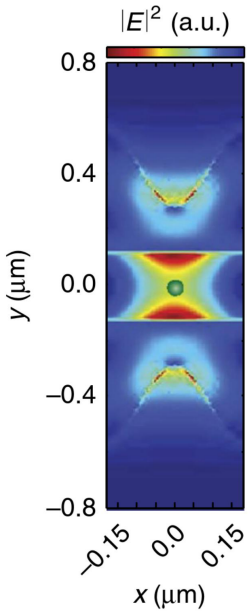


Orozco, Rolson doi: 10.1016/bs.aamop.2017.02.003

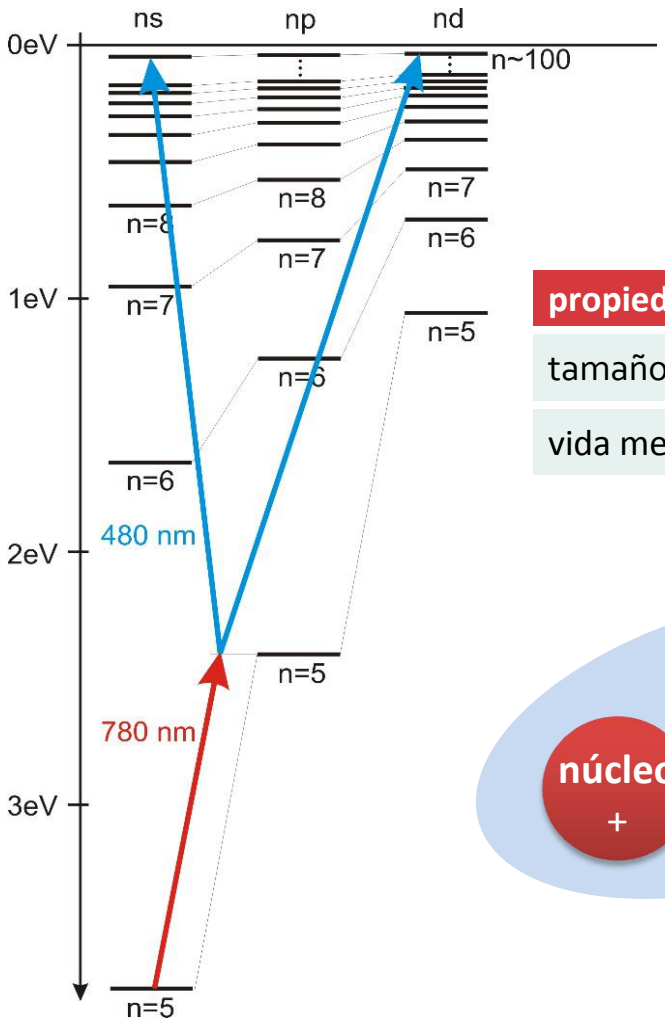
- Usando guías de ondas se puede comprimir la luz aún más que lo permitido por el límite de difracción en espacio libre.
- Al comprimir la luz se logra un mejor acomplamiento átomo-luz.



Kimble doi: 10.1038/ncomms4808



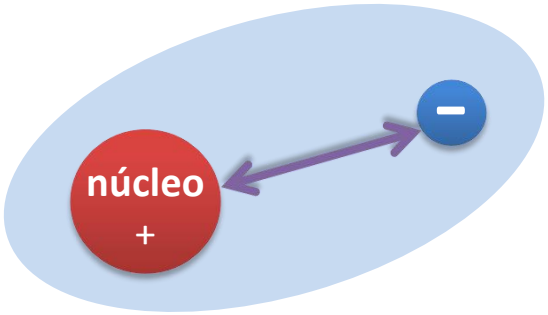
Otra opción: átomos de Rydberg



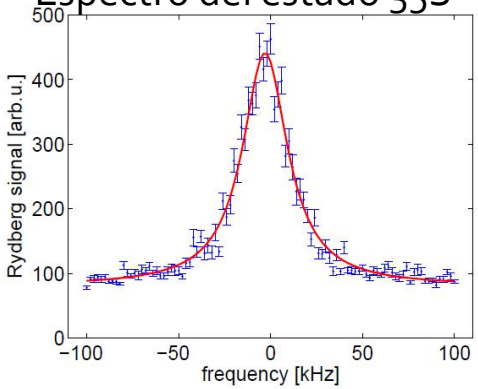
Estructura atómica del Rubidio

Electrón de valencia excitado
a un estado con ***n*** grande

propiedad	dependencia	^{87}Rb $100S_{1/2}$
tamaño <r>	~n^2	18210 a_0 = 0.96 µm
vida media	~n^3	1.24 ms



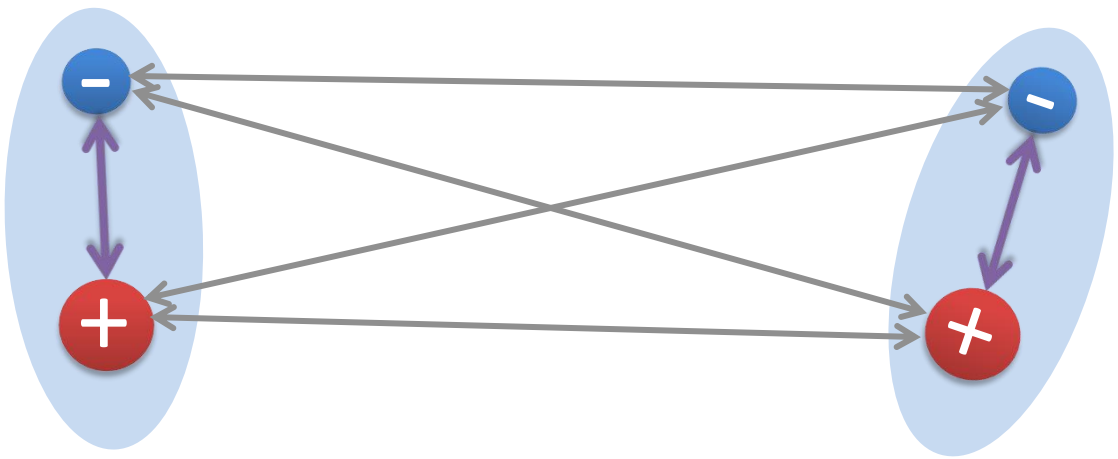
Espectro del estado 35S

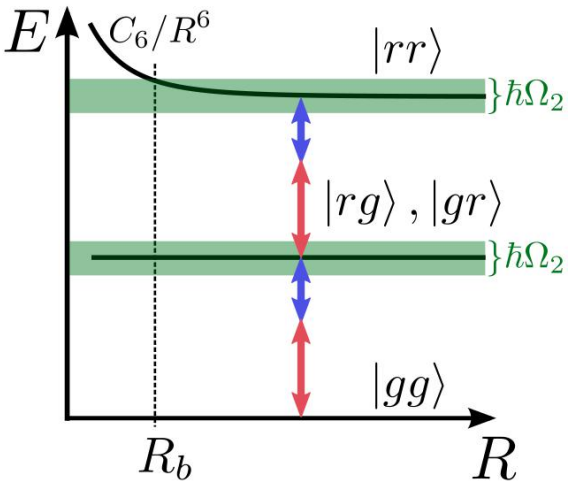


Interacción entre átomos de Rydberg

propiedad	dependencia	^{87}Rb 100S$_{1/2}$
polarizabilidad	$\sim n^7$	6.25 GHz (V/cm)$^{-2}$
Van der Waals C_6	$\sim n^{11}$	56.4 THz µm^6

de origen dipolo-dipolo



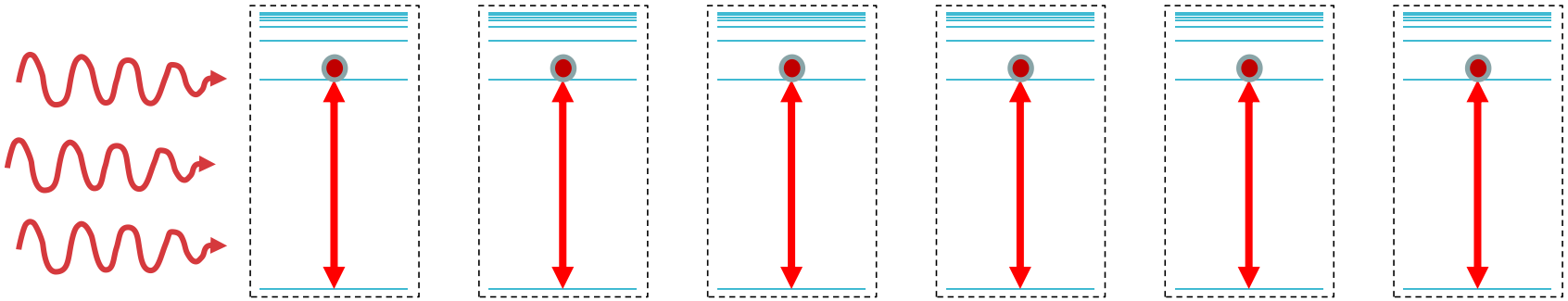


La interacción relevante es de tipo **van der Waals:**

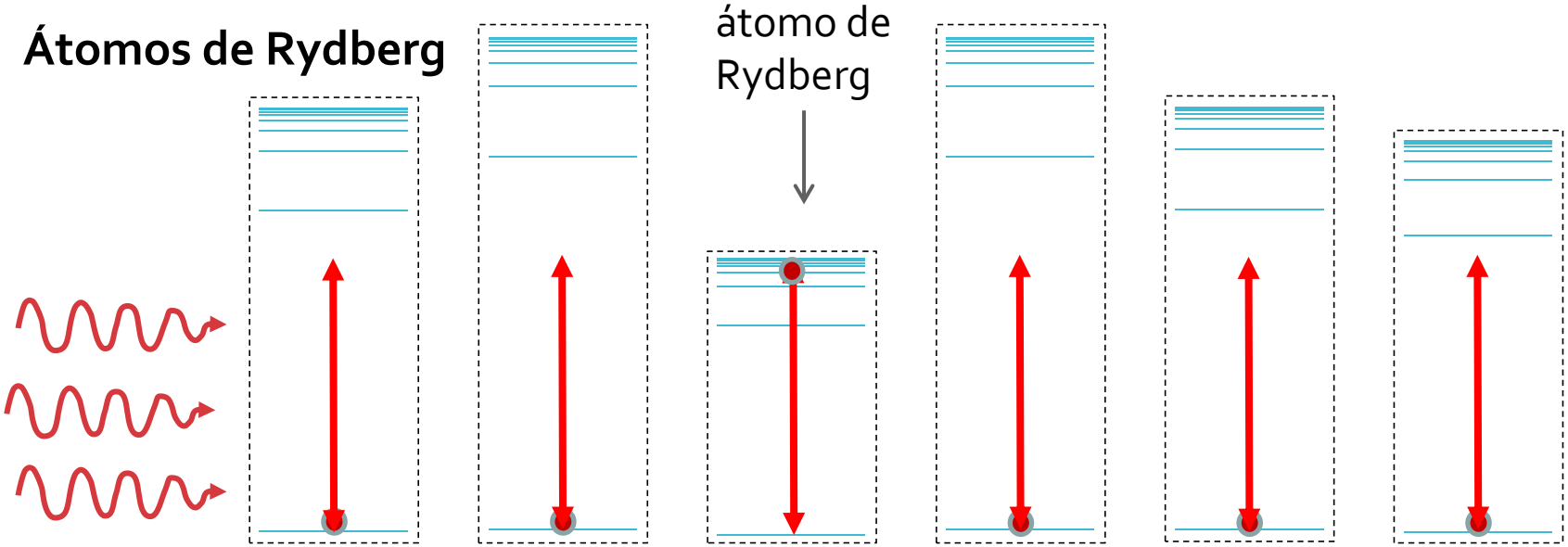
$$V_{vdW}(R,\theta) = \frac{C_6(\theta)}{R^6}$$

Bloqueo de Rydberg

Átomos poco excitados

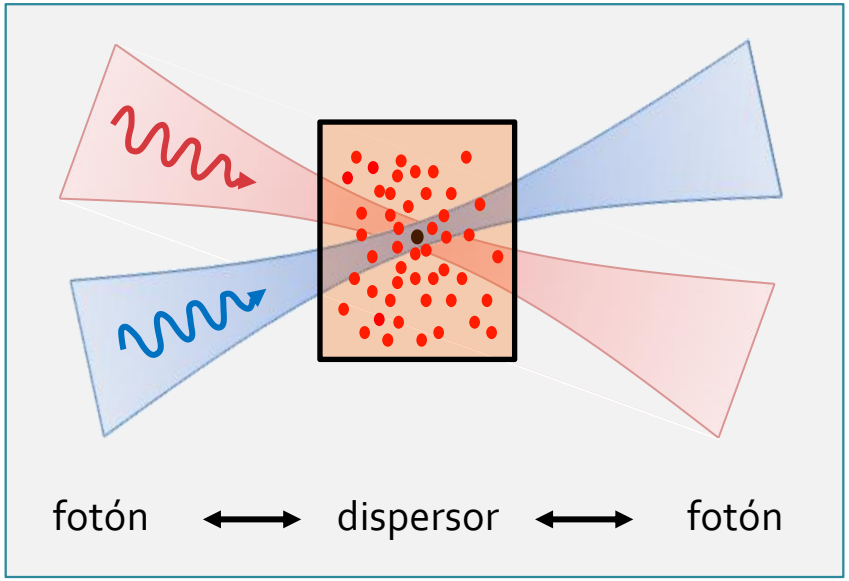


Átomos de Rydberg

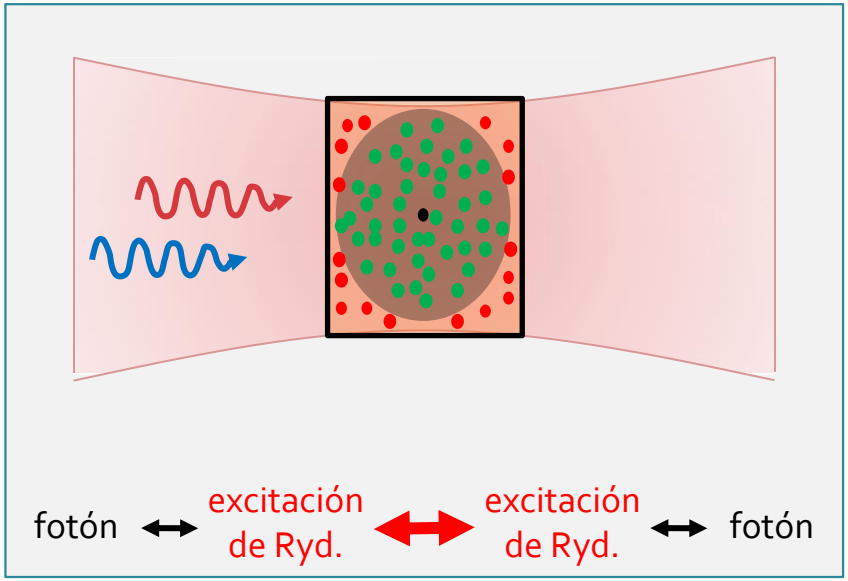


Interacción colectiva con la luz

Óptica no lineal convencional



No-linealidad colectiva de Ryd.



Un fotón afecta a más de 10,000 átomos

Exp.: Adams, Kuzmich, Vuletic, Lukin, Grangier, Dürr, Rempe,Hofferberth,...
Teo.: Fleischhauer, Kurizki, Lukin, Gorshkov, Pohl, Petroyan, Molmer,...

En los medios (no materiales)

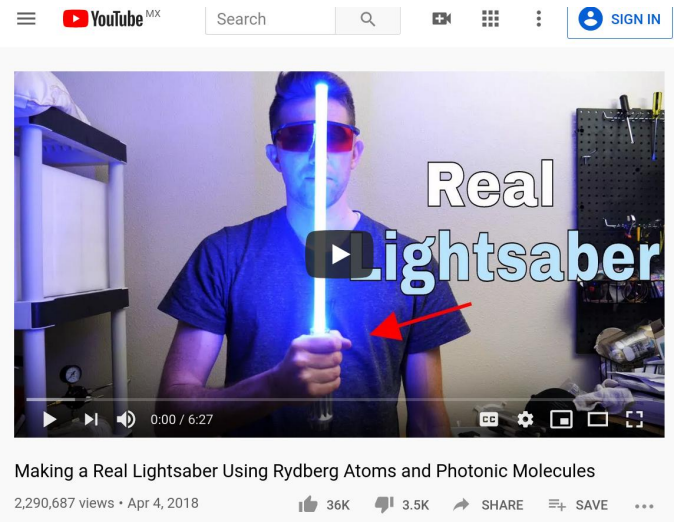
Daily Mail .com

Home | U.K. | News | Sports | U.S. Showbiz | Australia | Femail | Health | Science | Money |

Latest Headlines | NASA | Apple | Twitter | Games

Have scientists accidentally created a lightsaber? New form of matter discovered that has only ever been used in science-fiction

- Molecule behaves like lightsaber by moving photons around in a solid mass
- Discovery made after light particles were blasted through rubidium atoms
- The finding could help drive the development of quantum computing
- May lead to creation of 3D structures, such as crystals, wholly out of light



El resultado al que se refieren es

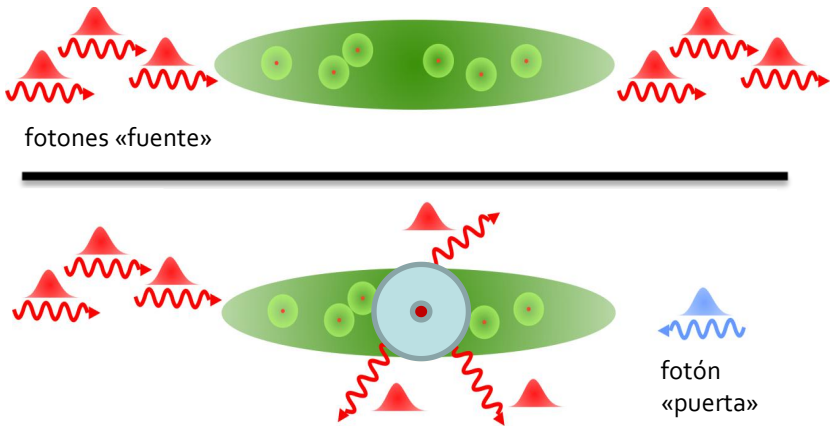
doi: 10.1038/nature12512

Y no tiene nada que ver con sables de luz.

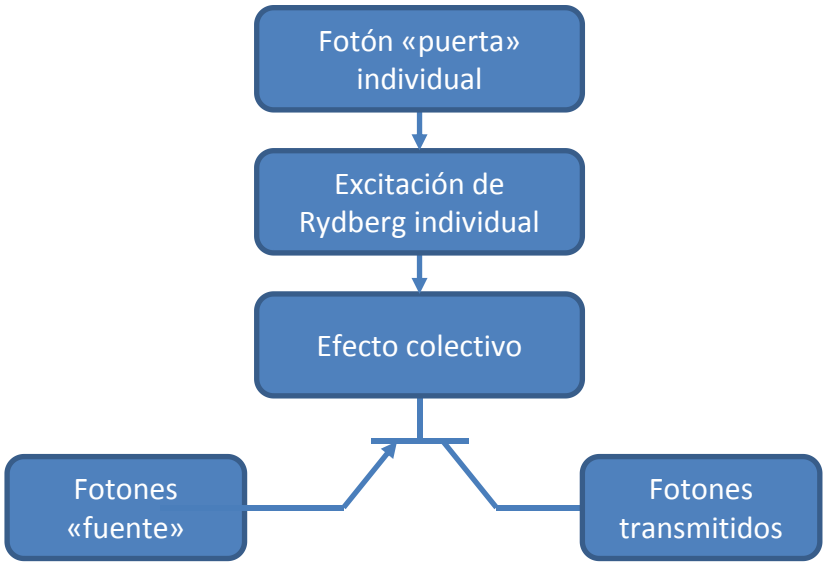
Dispositivos óptico-cuánticos con átomos de Rydberg

Transistor de fotones individuales

Sin fotón «puerta»:
«fuente» transmitida debido a TIE



Un fotón «puerta» almacenado:
el medio es opaco para los fotones «fuente»



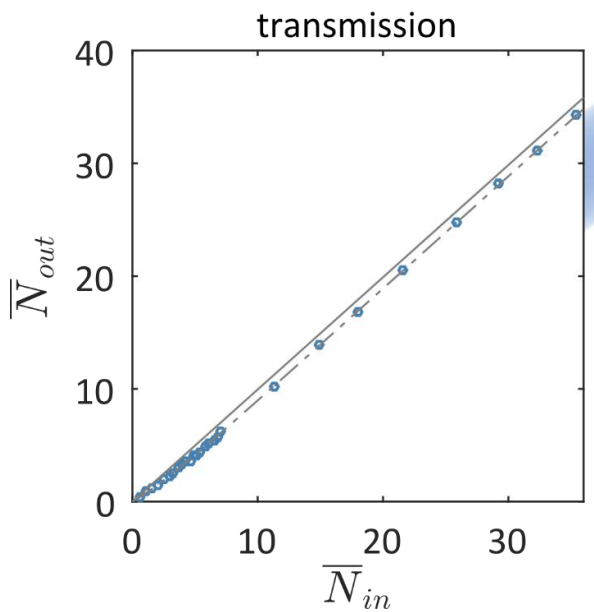
H. Gorniaczyk, C. Tresp, J. Schmidt, H. Fedder, S. Hofferberth,
Phys. Rev. Lett. **113**, 053601 (2014)

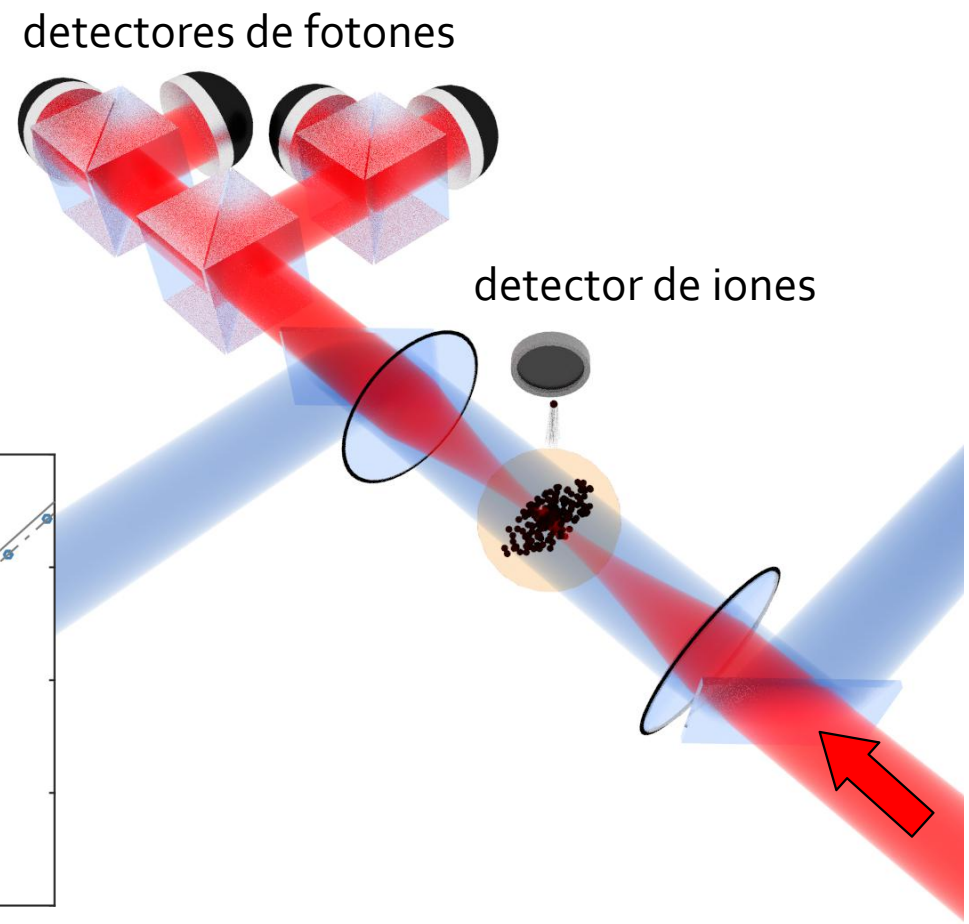
D. Tiarks, S. Baur, K. Schneider, S. Dürr, G. Rempe
Phys. Rev. Lett. **113**, 053602 (2014)

Sustractor de fotones individuales

Restar exactamente un fotón de un pulso arbitrario

Medio de Rydberg



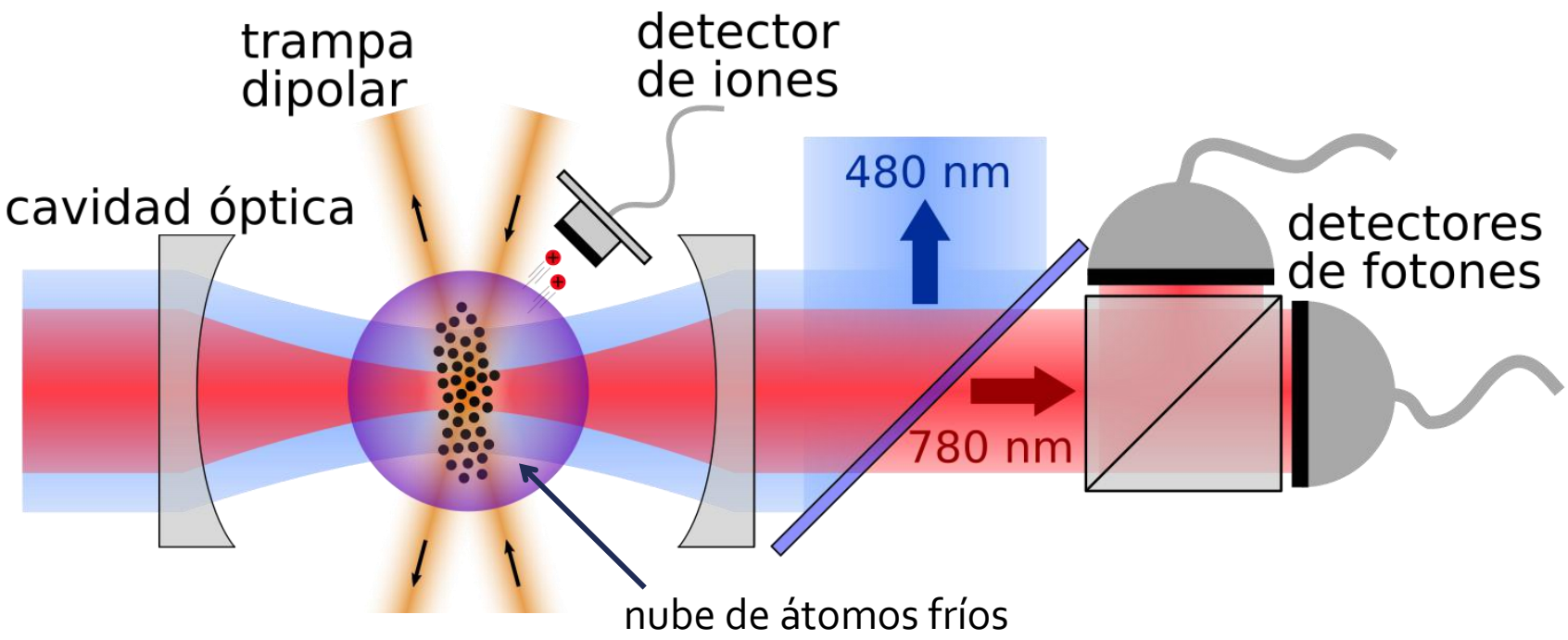


Usando $|r\rangle = |121S\rangle$

Tresp, C., Zimmer, C., Mirgorodskiy, I., Gorniaczyk, H., Paris-Mandoki, A., & Hofferberth, S. *PRL*, 117(22), 223001 (2016)

El Laboratorio

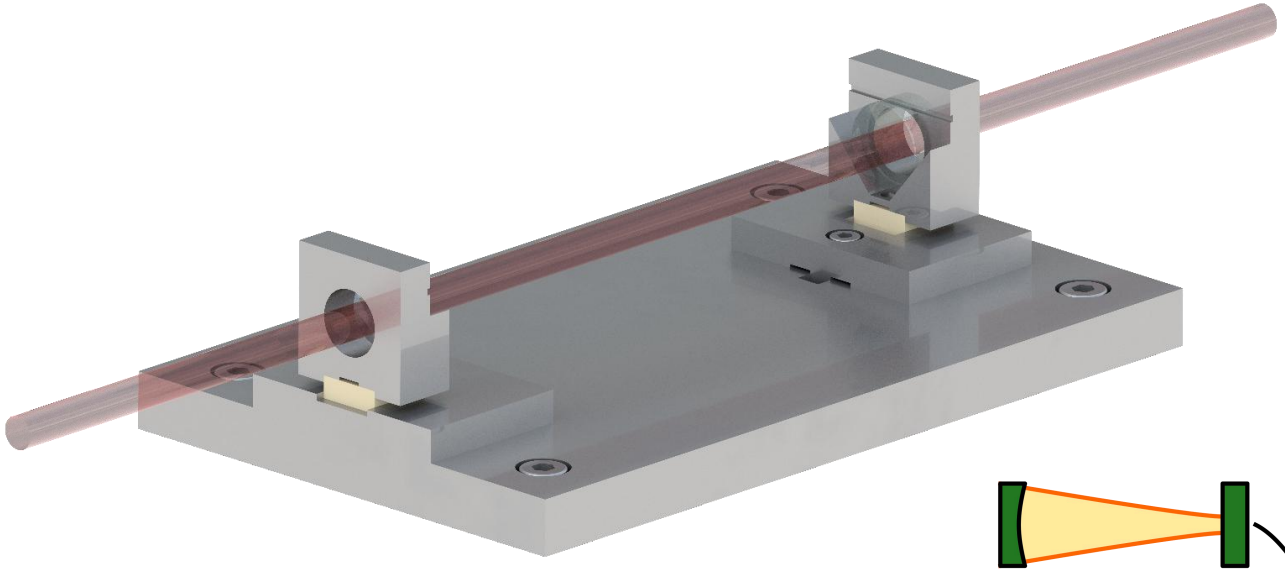
Esquema experimental



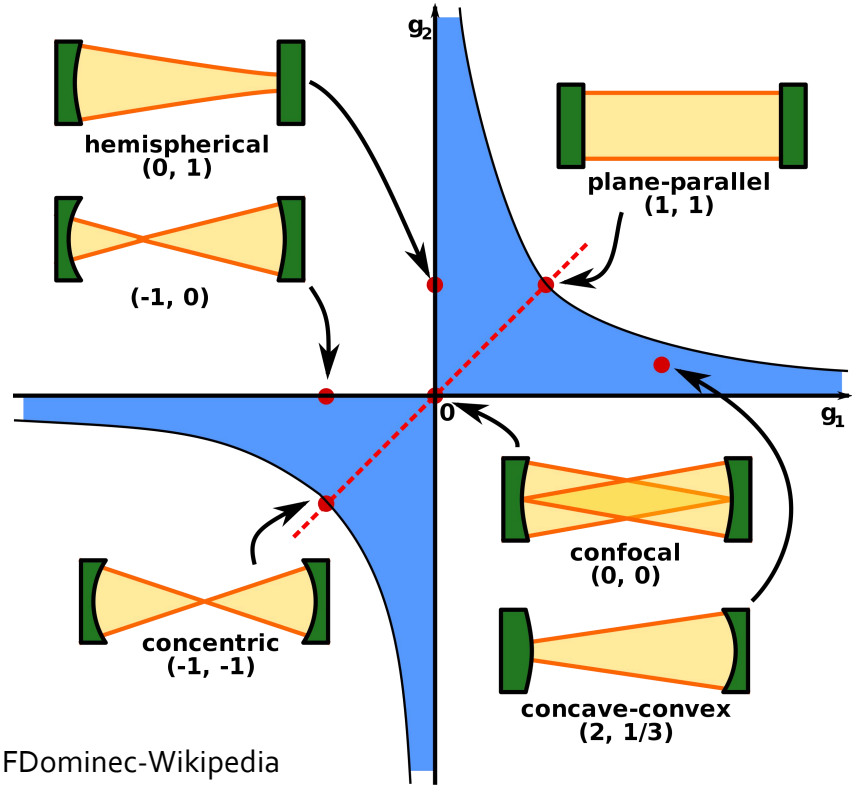
Realizar experimentos de electrodinámica cuántica en una cavidad de baja fineza:

Una cavidad de baja fineza permitiría amplificar los efectos no lineales de los átomos de Rydberg.

Cavidad atómica

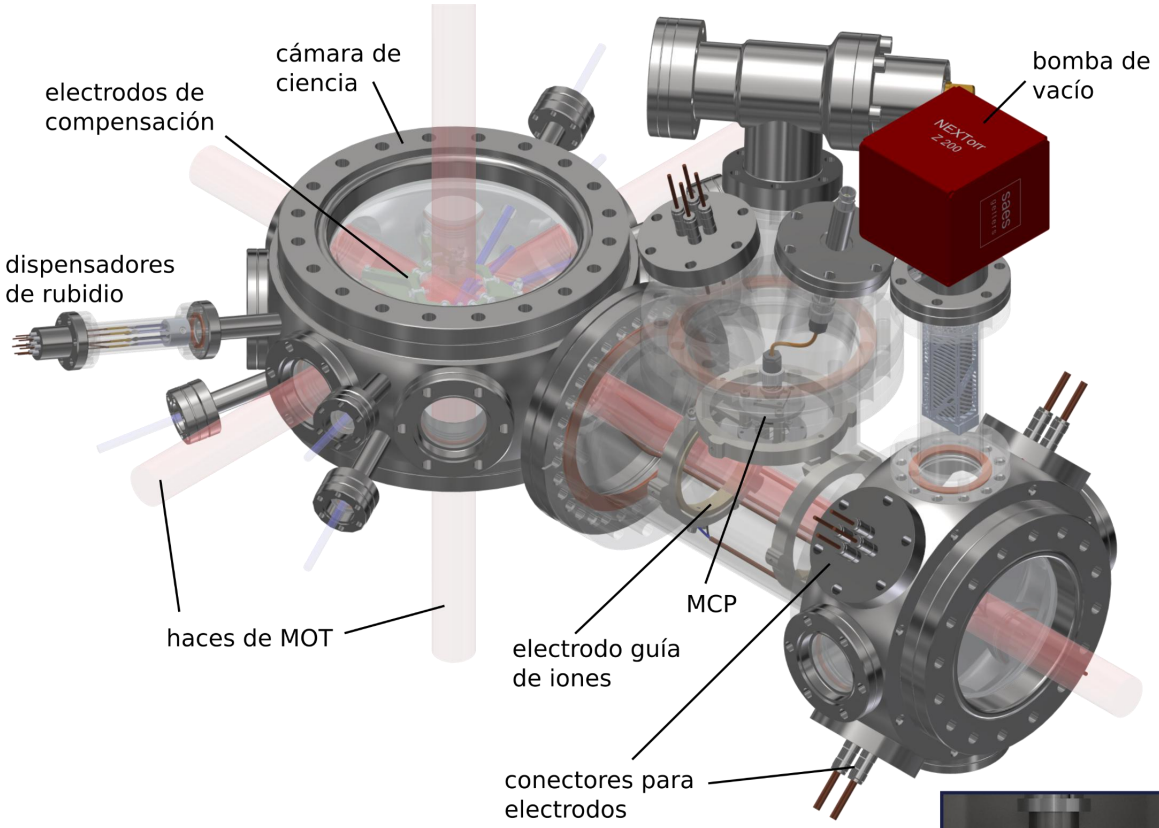


Trabajo de Leonardo Uhthoff

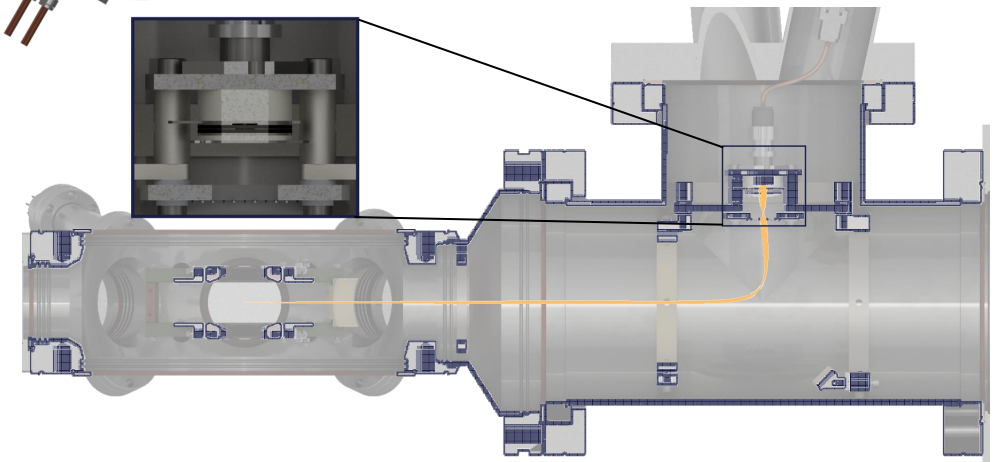


FDominec-Wikipedia

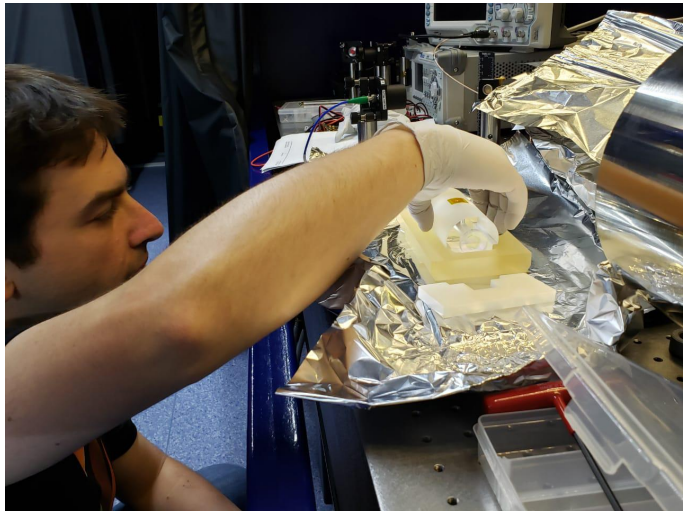
Sistema de vacío

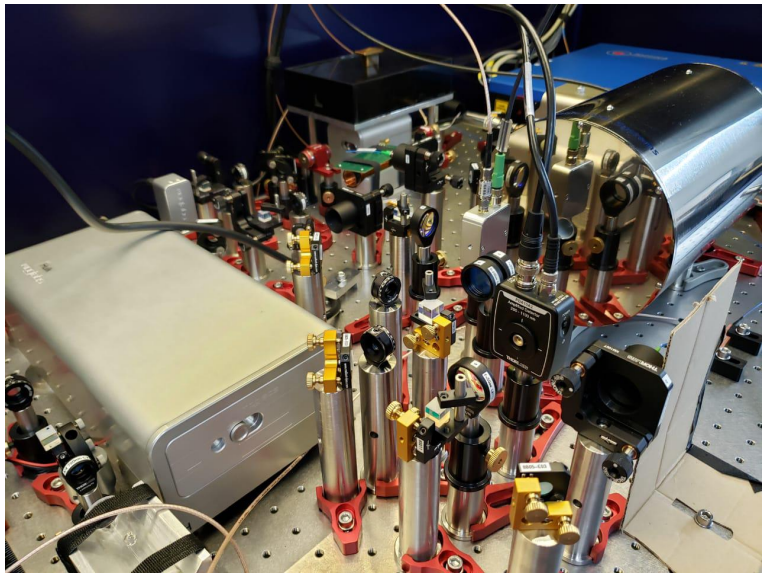


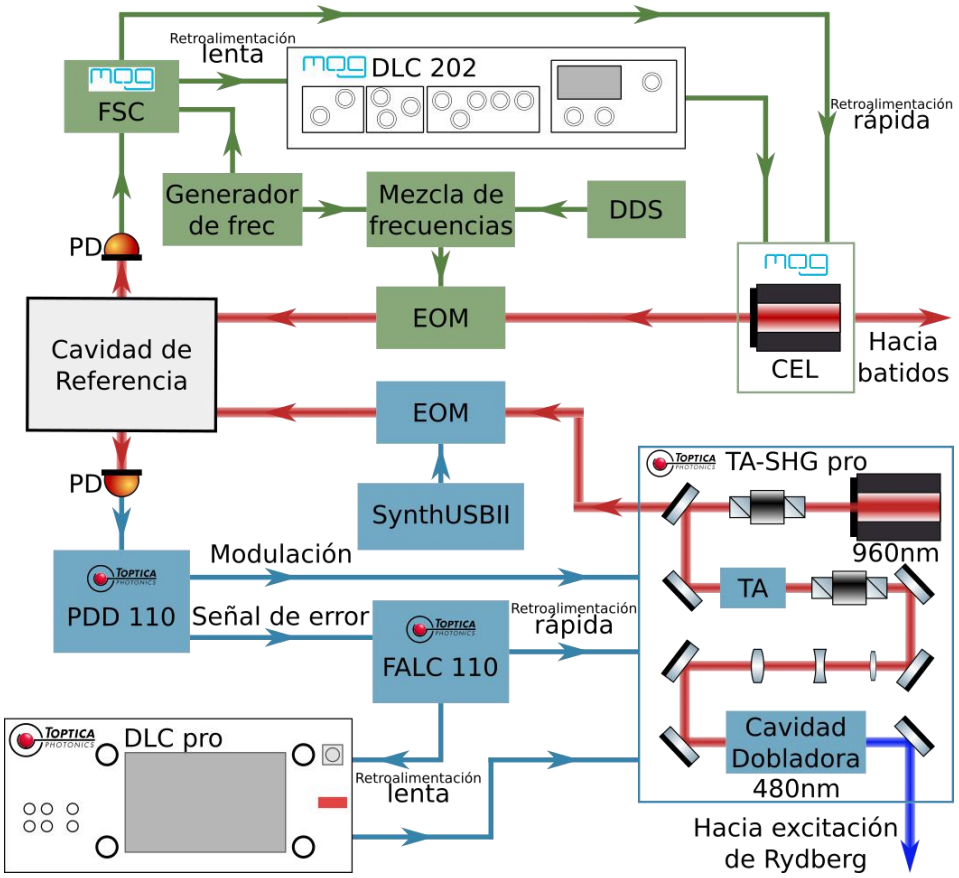
Trabajo de Giovanni Alonso



Sistema de láseres



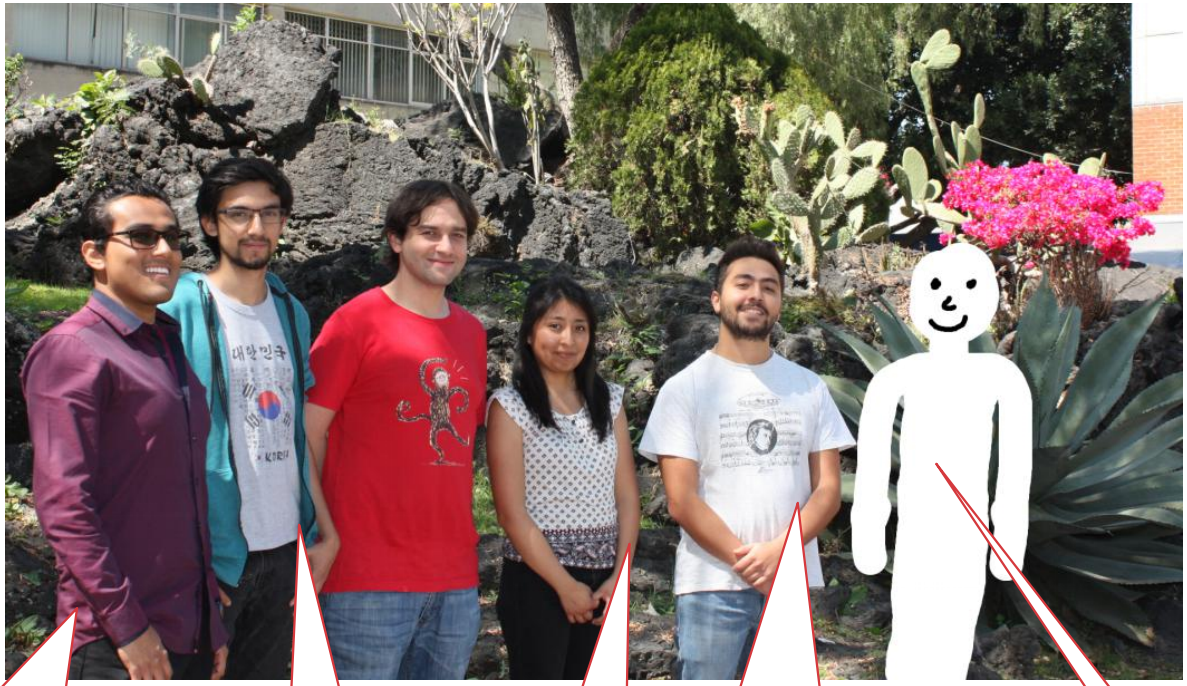




Trabajo de Eduardo Esquivel

¡Gracias!

Laboratorio de Óptica Cuántica de Rydberg



Edgar Giovanni Alonso Torres

Leonardo Uhthoff Rodríguez

Xochitl Mariana Rodríguez Aguirre

Eduardo Esquivel Ramírez

¿Tú?

Contacto: https://asaf.pm

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIA CUÁNTICA

CONACYT

Instituto de Física UNAM

dgapa