EL VÓRTICE ÓPTICO: UN OBJETO CURIOSO CON POSIBLE APLICACIONES A NANOTECNOLOGÍA

Guillermo F. Quinteiro

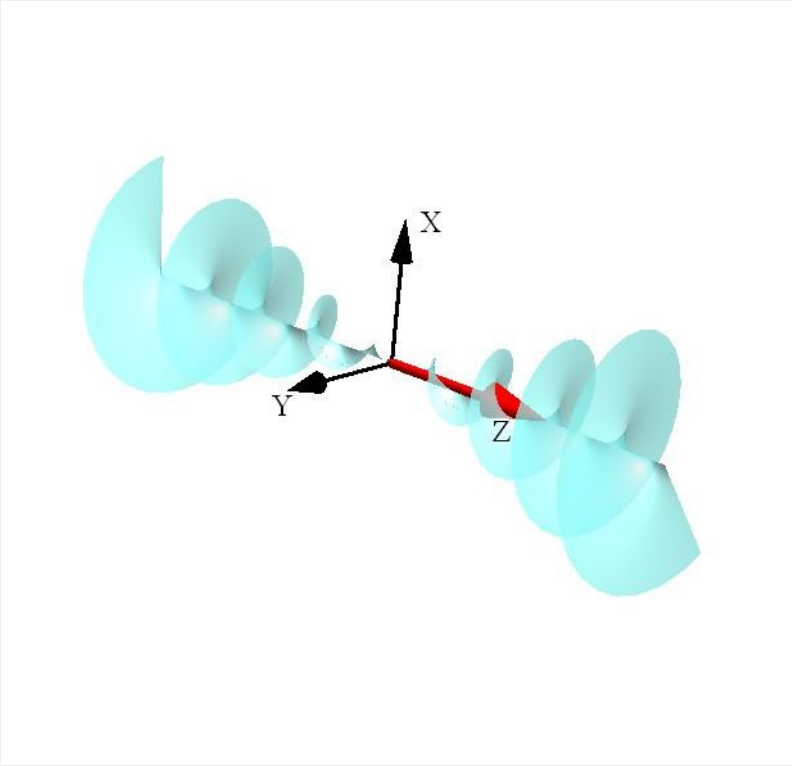
Departamento de Física
Universidad de Nacional del Nordeste
Corrientes, Argentina

CAPÍTULO 1
CONCEPTOS BÁSICOS

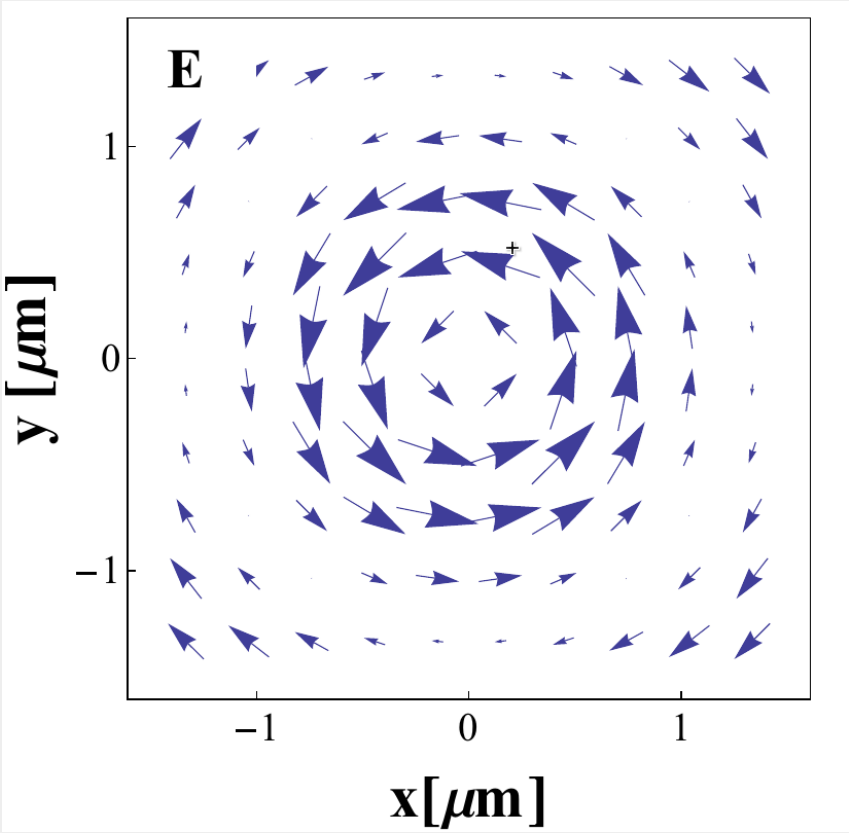
Vórtice Óptico

“twisted light”
“luz con momento angular orbital”

Campo de luz altamente inhomogéneo con singularidades de fase

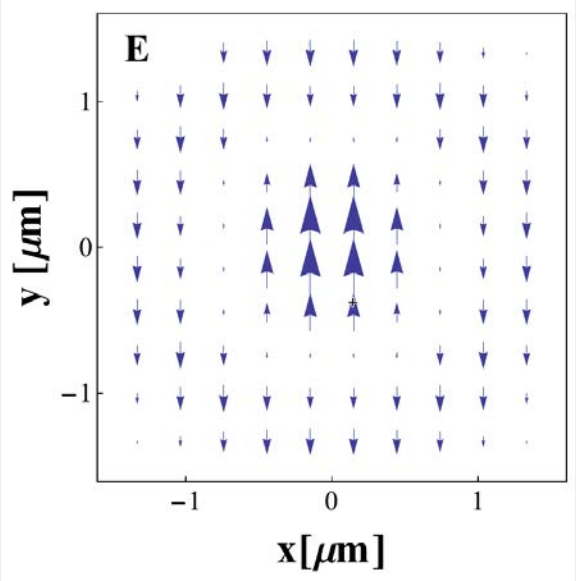


Vórtice óptico



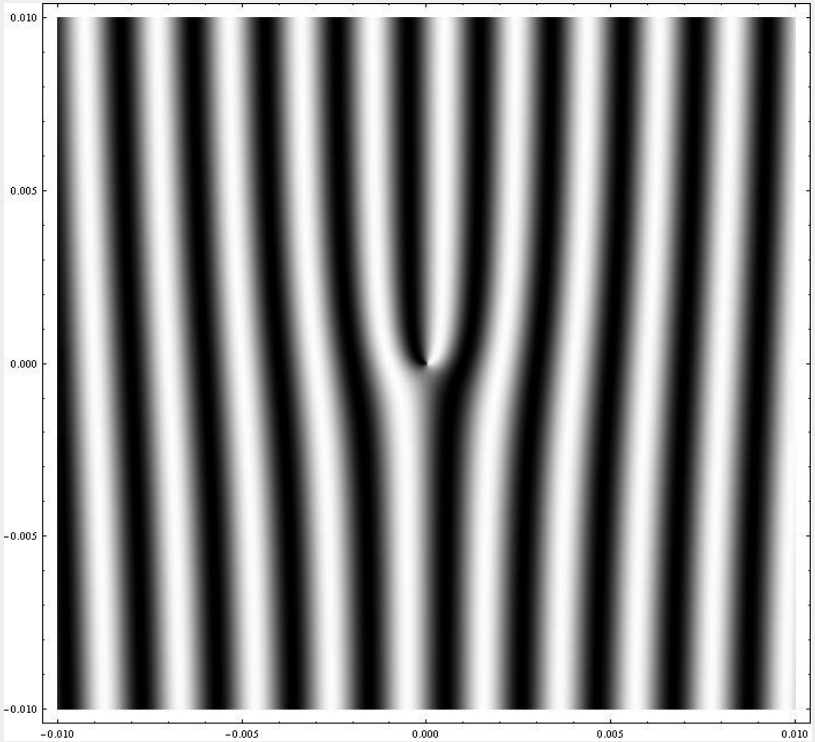
Campo eléctrico perpendicular a dirección de propagación

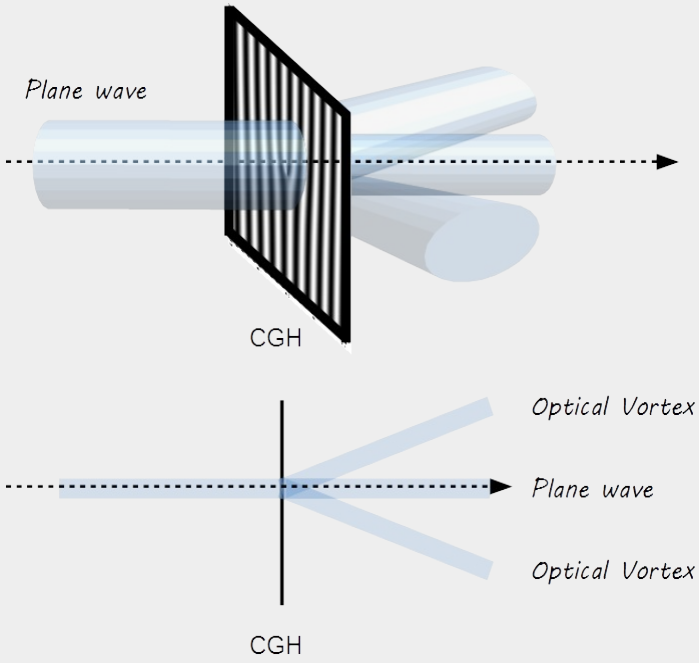
Haz Gaussiano



Generación

Método mejor conocido: *Computer generated holograms*





Se produce calculando la interferencia entre una onda plana/haz Gaussiano y un vórtice óptico

La generación de vórtices ópticos es simple y económica

CAPÍTULO 2
CURIOSIDADES

¿Cómo se ven los haces laser y cómo interactúan con la materia?

Haz Gaussiano
(u onda plana)

¿Cómo se ve el campo?

¿Cómo se ve el campo?

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = E_0(\mathbf{r})e^{i(kz-\omega t)}\hat{\varepsilon}_\sigma$$

$$\hat{\varepsilon}_\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{x} + i\sigma\hat{y})$$ Vector polarización

$$\sigma = -1, +1$$

Con corrección: campo longitudinal

$$E_z(\mathbf{r},t) = \frac{1}{w_0 k} E_0'(\mathbf{r})e^{i(kz-\omega t)}\hat{z}$$

w_0 Cintura del haz

$k = 2\pi/\lambda$ Número de onda

Para haces colimados, la ***Ez*** se puede despreciar

¿Qué tipo de interacción (Hamiltoniano) considerarías?

¿Qué tipo de interacción (Hamiltoniano) considerarías?

La interacción dipolar…

$$H_d = -e\mathbf{r} \cdot \mathbf{E}(t)$$

Sin dependencia espacial de ***E*** y
sin interacción magnética

Al interactuar, la luz se reduce a un campo eléctrico transversal

Vórtices ópticos

Los vórtices ópticos son campos complejos con propiedades inusuales...

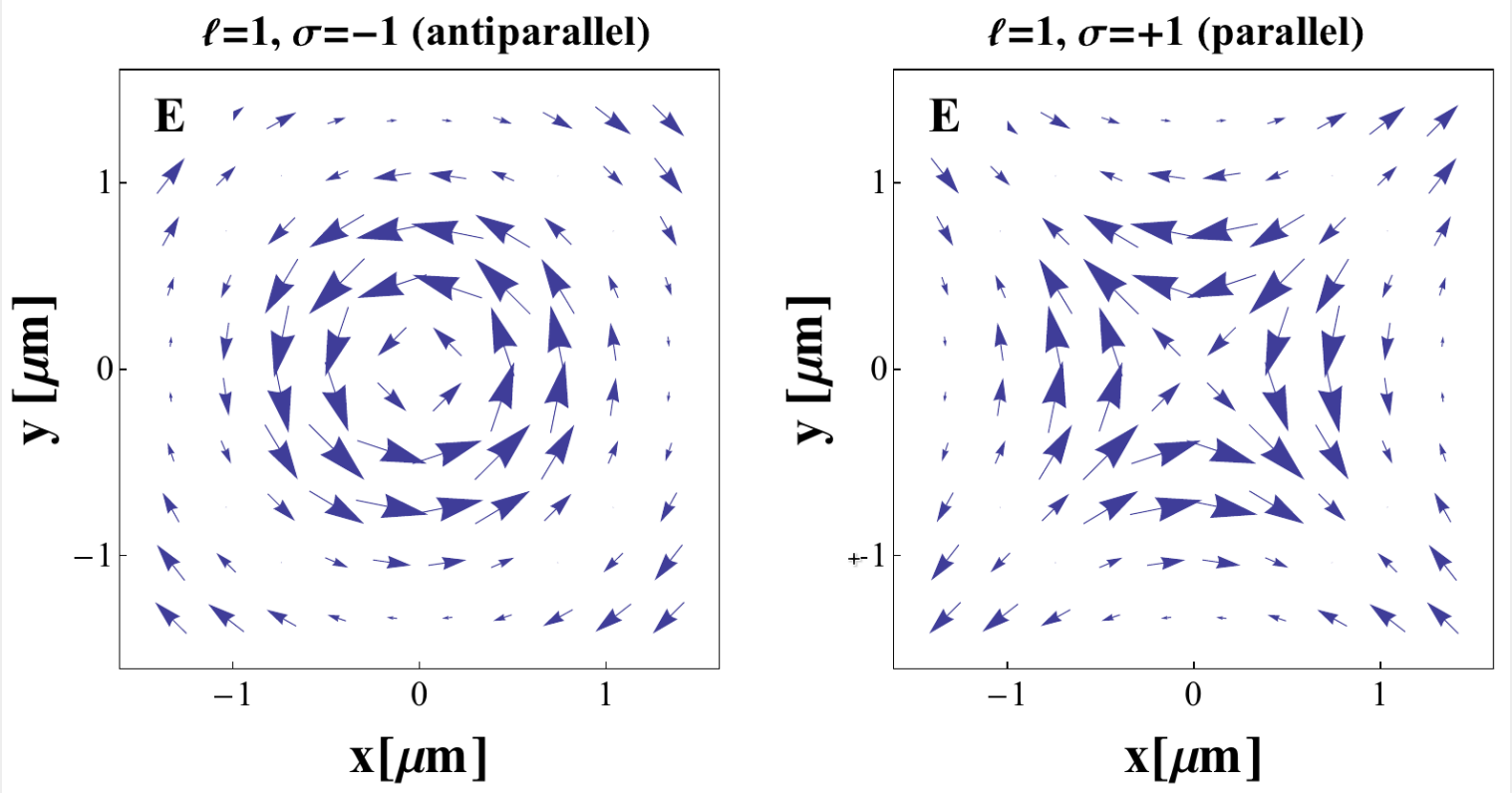
¿Cómo se ve el campo?

Momento angular de SPIN (índice de polarización) $\sigma = -1, +1$

Momento angular ORBITAL (carga topologica) $\ell = \ldots, -1, +1, \ldots$

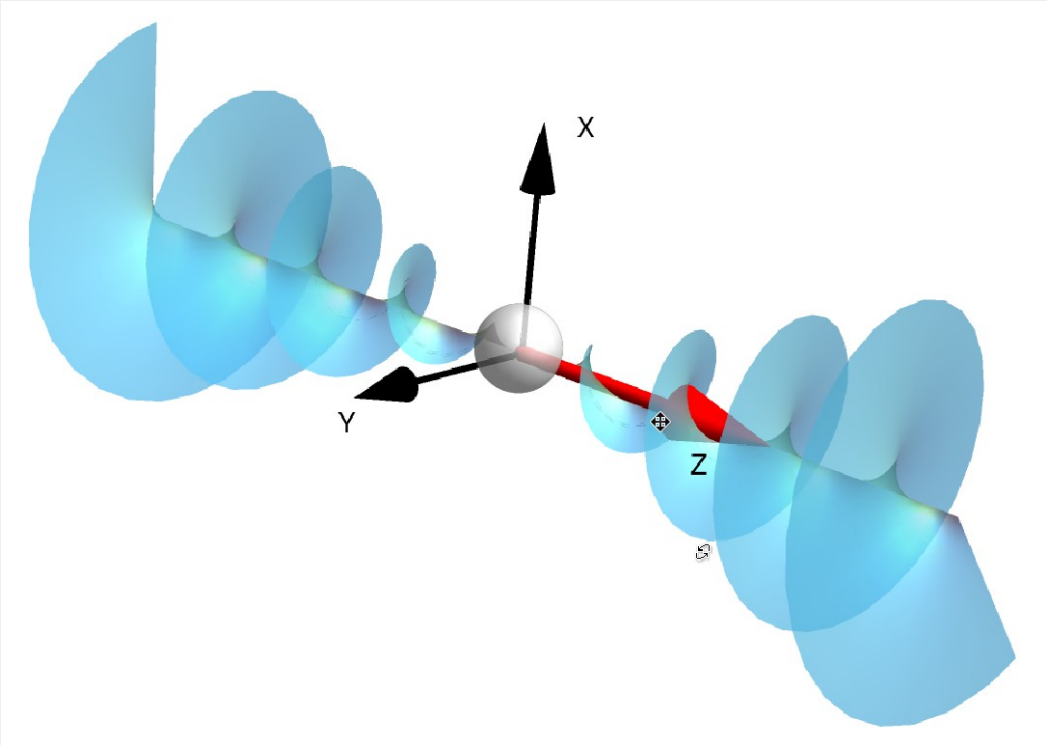
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \left[\hat{\varepsilon}_\sigma F_\perp(\mathbf{r}) e^{i\ell\varphi} + \hat{z} F_z(\mathbf{r}) e^{i(\ell+\sigma)\varphi} \right] \; e^{i(kz - \omega t)}$$

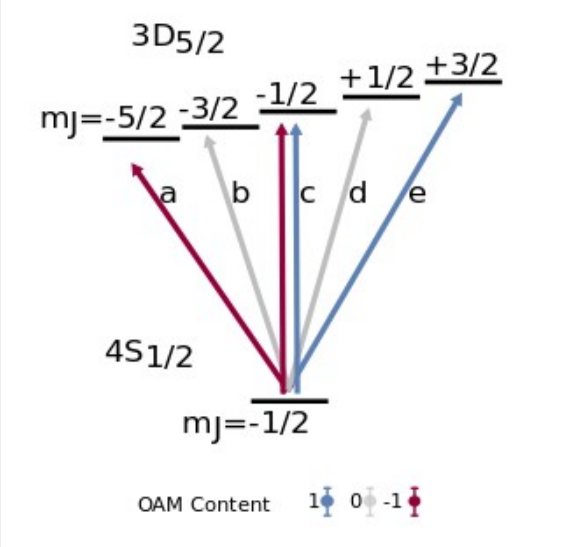
$\hat{\varepsilon}_\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{x} + i\sigma\hat{y})$ (vector polarización)



Cosas inusuales ocurren cuando el momento angular y de spin son anti-paralelos

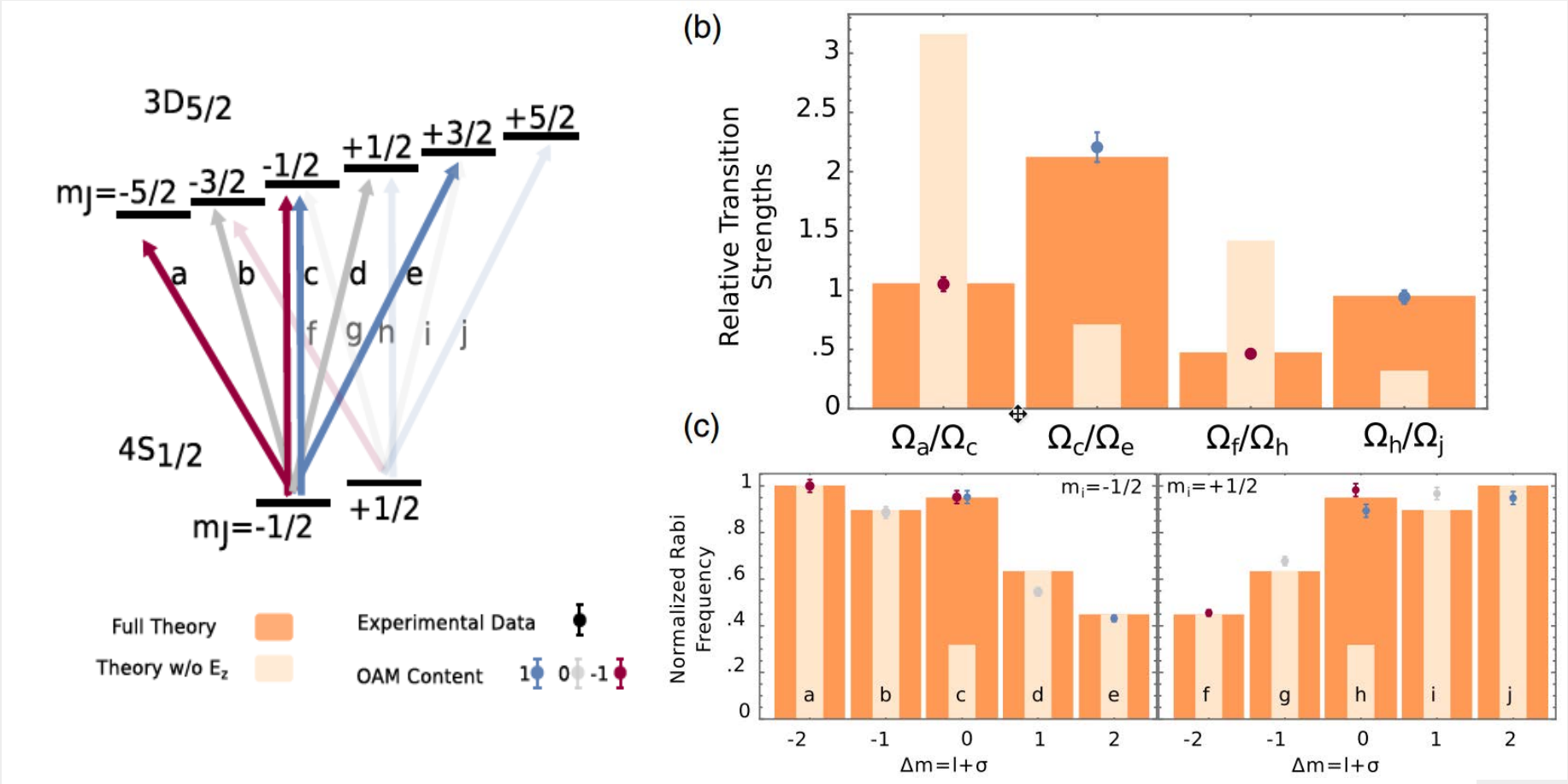
Campo eléctrico longitudinal





Experimento: excitación de un ión Ca con haces colimados

(*Phys. Rev. Lett. 119, 253203 (2017)*, ***Editors' Suggestion***)



Full Theory: incluye todas las componentes de E

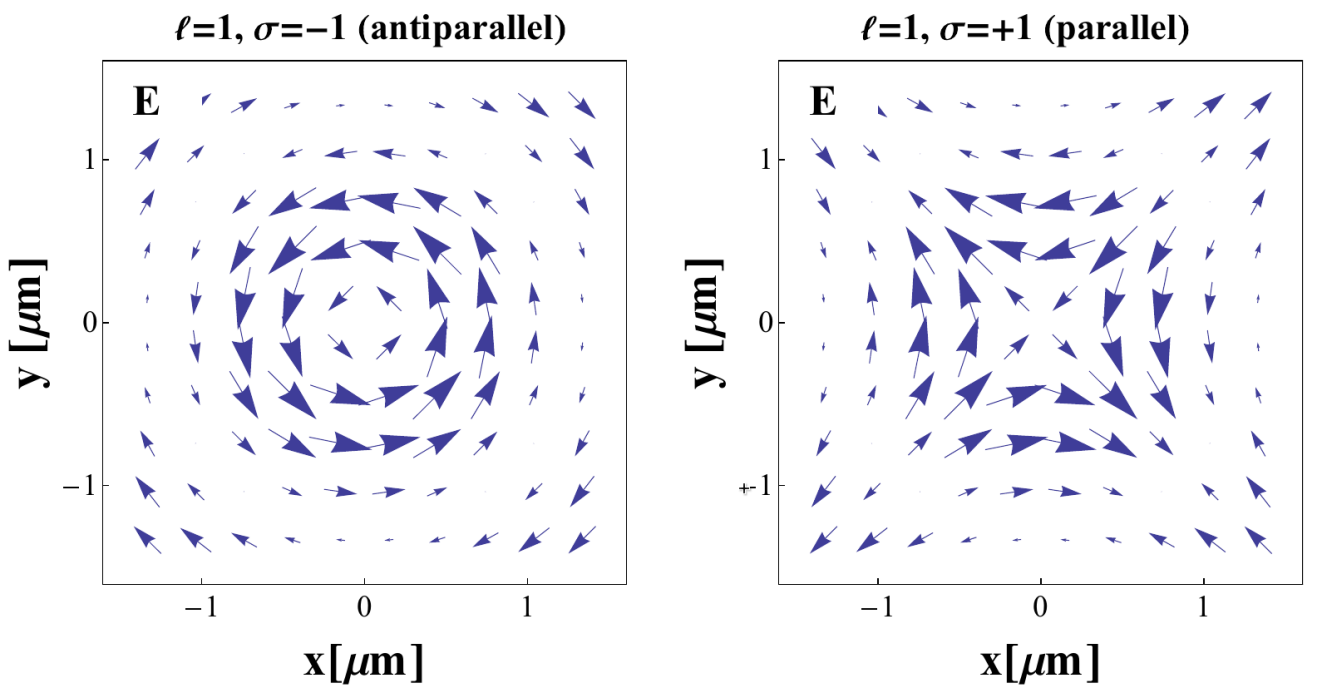
Interacción magnética

En el gauge de Coulomb

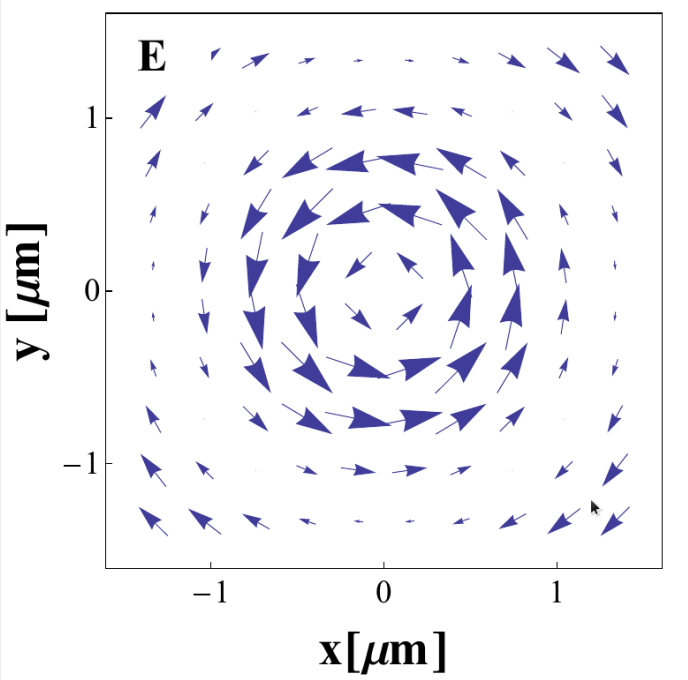
$$\mathbf{A}(\mathbf{r},t) \propto \mathbf{E}(\mathbf{r},t)$$

[**A**(**r**,t) vector potential]

El mismo gráfico sirva para **E**(**r**,t) y **A**(**r**,t)



A(**r**,t) anti-paralelo claramente tiene rotor no nulo (el campo “rota”)



$$\nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \neq 0$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \neq 0$$

$\ell > 0$

Paralelo

$$\tilde{B}_z(\mathbf{r}) \quad \propto \quad \frac{1}{w_0 k}\left(\frac{r}{w_0}\right)^{\ell+1} e^{i(\ell+1)\varphi},$$

Anti-paralelo

$$\tilde{B}_z(\mathbf{r}) \quad \propto \quad \frac{1}{w_0 k}\left(\frac{r}{w_0}\right)^{\ell-1} e^{i(\ell-1)\varphi}.$$

Para $\ell = 1$ B es constante

Para $\ell = 2$ anti-paralelo Bxy es constante

Por tanto, hay que incluir la interacción magnética

$$H_m = \frac{2}{|\ell| + 2 - j}\mathbf{B}_\perp(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{m} + \frac{2}{|\ell + \sigma| + 2} B_z(\mathbf{r}, t) m_z$$

Parece dipolar magnética pero no lo es

Bibliografía relacionada

. G. F. Quinteiro et al, physical review a **91**, 033808 (2015)

. Marco Ornigotti et al, optics express 15530 (2013)

. Klimov et al, physical review a **85**, 053834 (2012)

. Zurita-Sanchez et al, JOSA B 19 (2002)

NOTA: Se pueden generar haces con diferente proporción de *E* y *B*

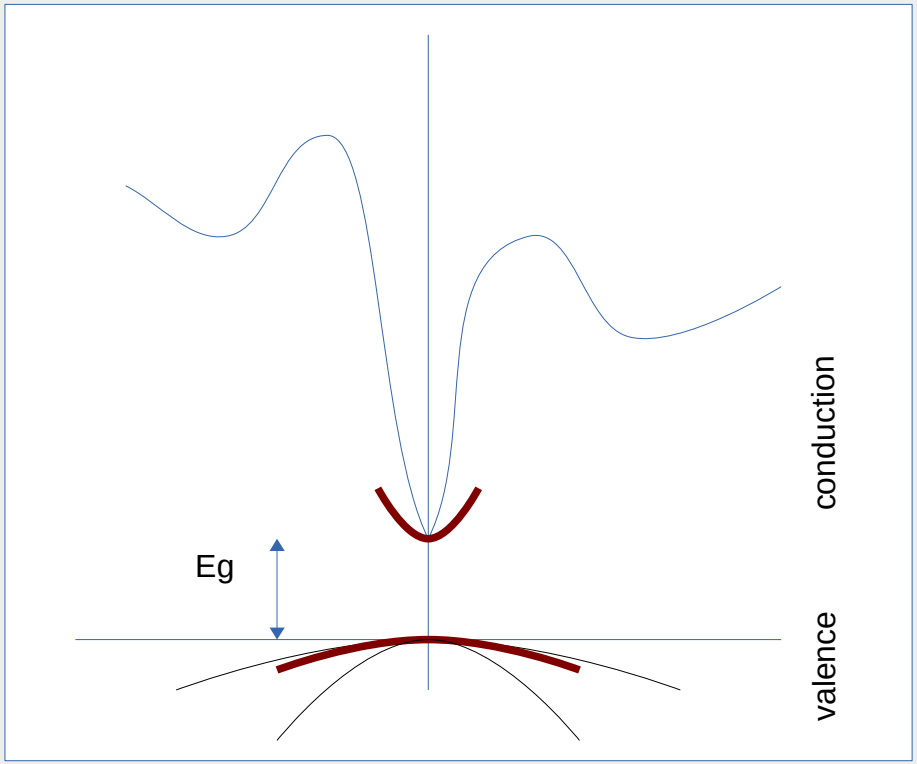
G. F. Quinteiro et al, Phys Rev A 99, 023845 (2018)

Al interactuar, el vórtice óptico es un campo eléctrico y magnético con componentes en todas las direcciones

CAPÍTULO 3
INTERACCIÓN CON PUNTOS CUÁNTICOS (QD)

Podemos explotar las “curiosidades” de los Vor. Opt. para controlar el estado electrónico del QD

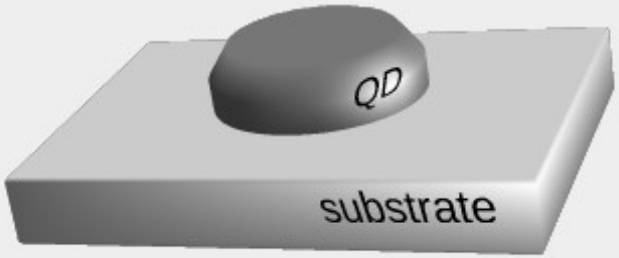
Semiconductores



Bulk

Self-Assembled QD
(ideas aplicables a átomos y moléculas)

Estudiaremos transiciones electrónicas en el QD, sin tener en cuenta interacción de Coulomb

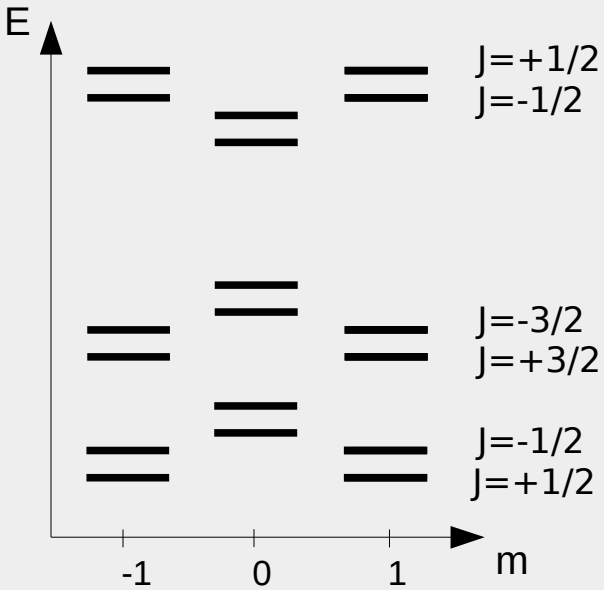


$$\psi(\mathbf{r}) = R_\alpha(r) e^{im\varphi} u_b(\mathbf{r}) \eta$$

Envelope (macro) AM

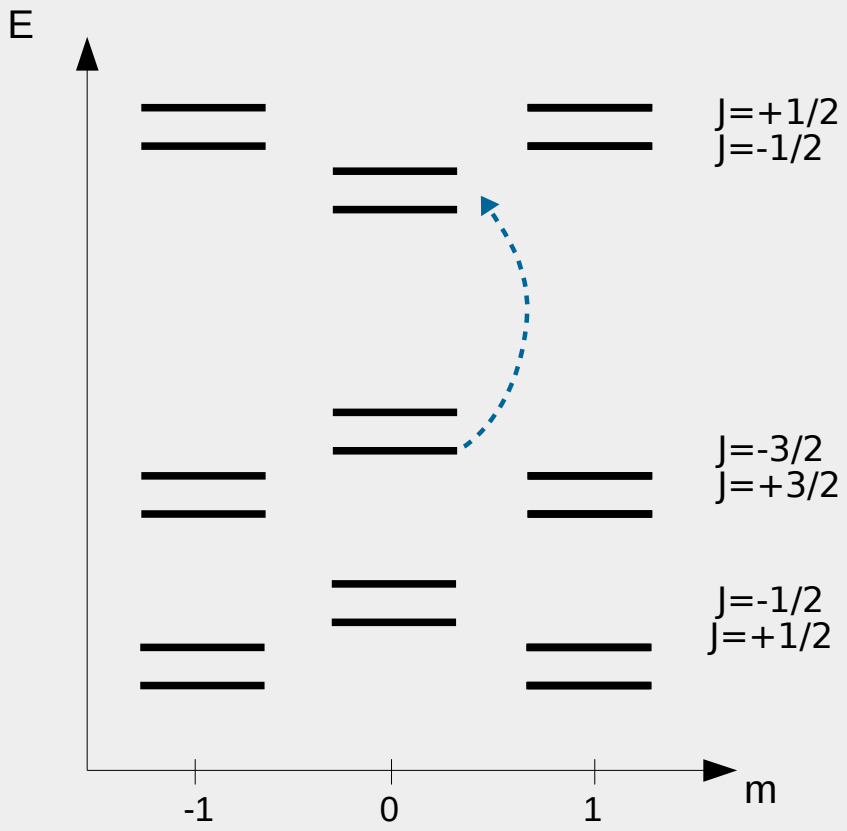
Band (micro) AM

Spin AM



Para moléculas pensar en LUMO y HOMO

Interacción con ondas planas



Analicemos 3 modos de excitación de un pulso Vor. Opt.:

Polarización circular σ

$$
\begin{aligned}
\mathbf{E(r)} &= iE_0 J_\ell(q_r r) e^{i\ell\varphi}\mathbf{e}_\sigma \\
&\quad + \sigma \frac{q_r}{q_z}\frac{E_0}{\sqrt{2}} J_{\ell+\sigma}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma)\varphi}\mathbf{e}_z\,, \\
\mathbf{B(r)} &= \sigma B_0 J_\ell(q_r r) e^{i\ell\varphi}\mathbf{e}_\sigma + \sigma\frac{B_0}{2}\boxed{\left(\frac{q_r}{q_z}\right)^2} \\
&\quad \times \Big[J_{\ell+\sigma+1}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma+1)\varphi}\mathbf{e}_- \\
&\quad + J_{\ell+\sigma-1}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma-1)\varphi}\mathbf{e}_+ \Big] \\
&\quad - i\frac{B_0}{\sqrt{2}}\frac{q_r}{q_z} J_{\ell+\sigma}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma)\varphi}\mathbf{e}_z\,,
\end{aligned}
$$

Componente z

Grado de enfoque

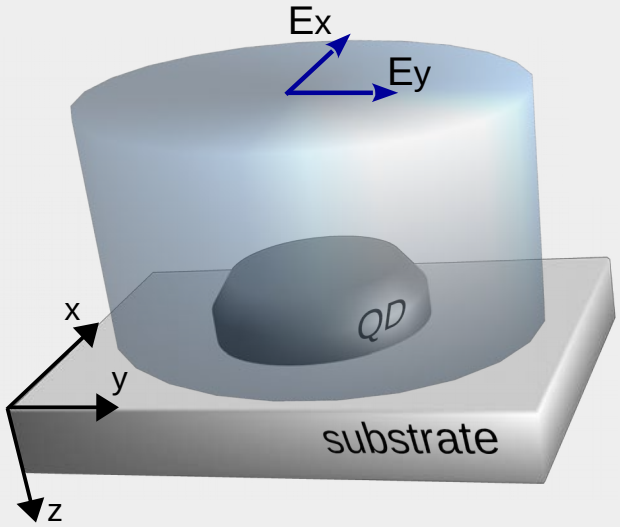
Ambas polarizaciones presentes

Por ejemplo, uno puede preparar el experimento para que Ez sea la componente más relevante:

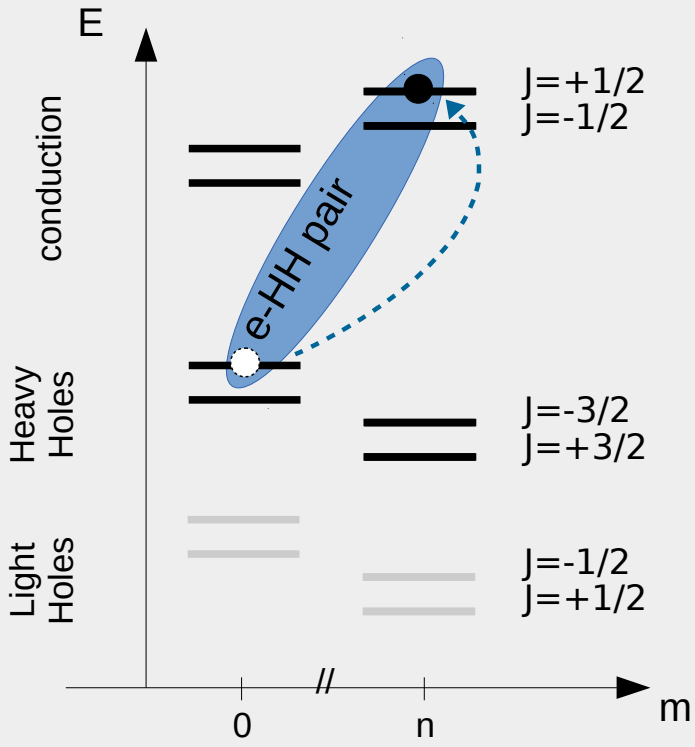
$$
\begin{aligned}
\mathbf{E}(\mathbf{r}) &= iE_0 J_\ell(q_r r) e^{i\ell\varphi}\mathbf{e}_\sigma \\
&\quad + \sigma \frac{q_r}{q_z}\frac{E_0}{\sqrt{2}} J_{\ell+\sigma}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma)\varphi}\mathbf{e}_z \,, \\
\mathbf{B}(\mathbf{r}) &= \sigma B_0 J_\ell(q_r r) e^{i\ell\varphi}\mathbf{e}_\sigma + \sigma \frac{B_0}{2}\left(\frac{q_r}{q_z}\right)^2 \\
&\quad \times \Big[J_{\ell+\sigma+1}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma+1)\varphi}\mathbf{e}_- \\
&\quad + J_{\ell+\sigma-1}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma-1)\varphi}\mathbf{e}_+ \Big] \\
&\quad - i\frac{B_0}{\sqrt{2}}\frac{q_r}{q_z} J_{\ell+\sigma}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma)\varphi}\mathbf{e}_z \,,
\end{aligned}
$$

1. Campo eléctrico trasverso

$$\ell = \pm n \quad \sigma = \pm 1$$



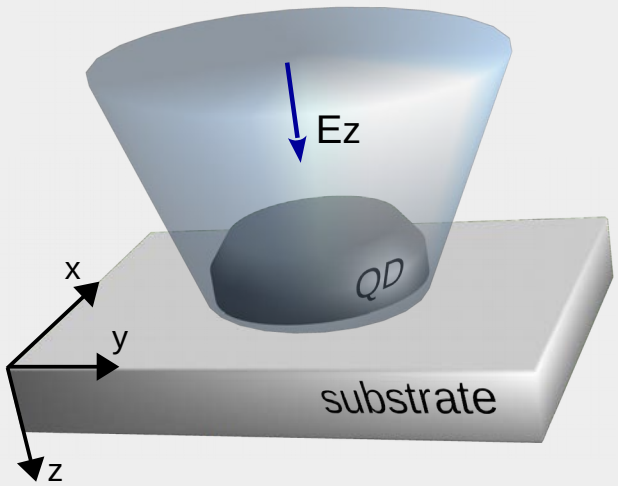
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad = \quad iE_0 J_\ell(q_r r) e^{i\ell\varphi}(\mathbf{e}_x + \sigma \mathbf{e}_y)$$



e^- - heavy-hole pair con momento angular macroscópico (“envelope”)

2. Campo eléctrico longitudinal, no paraxial

$$\ell = \pm 1 \quad \sigma = \mp 1$$

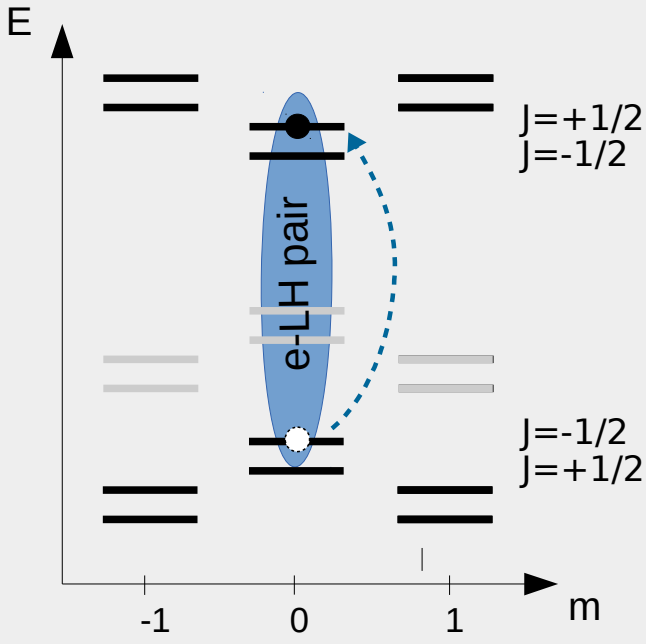


$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad = \quad \sigma \frac{q_r}{q_z} \frac{E_0}{\sqrt{2}} J_{\ell+\sigma}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma)\varphi} \mathbf{e}_z$$

Estados de light hole (LH) tienen orbital p_z

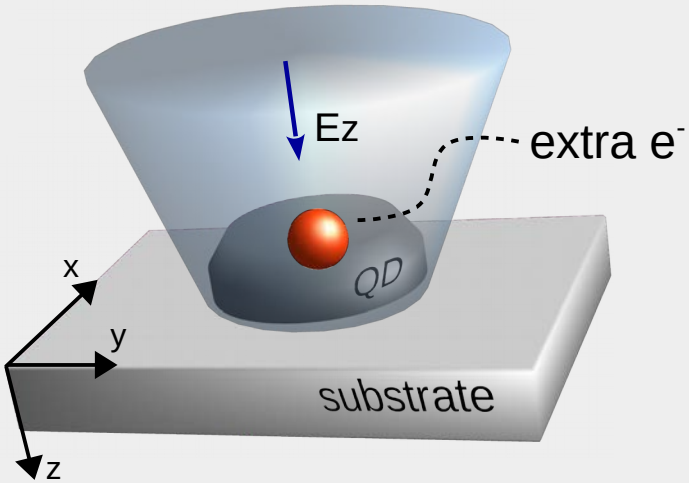
$$|LH+\rangle = -1/\sqrt{6}[(|p_x\rangle + i|p_y\rangle) \downarrow -2|p_z\rangle) \uparrow]$$

Que se acopla con Ez



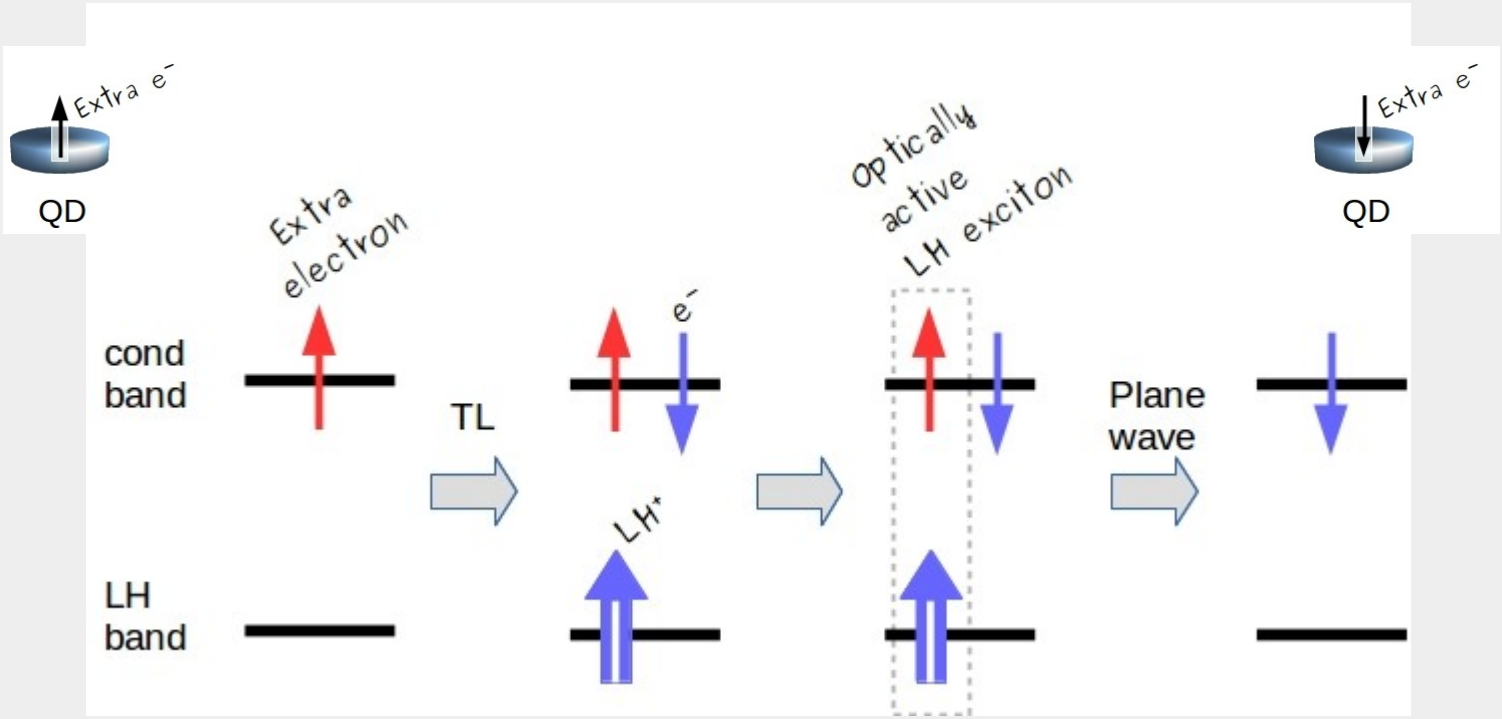
e^- - light-hole pair sin momento angular microscópico (banda) ni macroscópico (“envelope”)

Applicación a control de spin



Quisiéramos controlar el spin de un electrón agregado al QD

Protocolo:

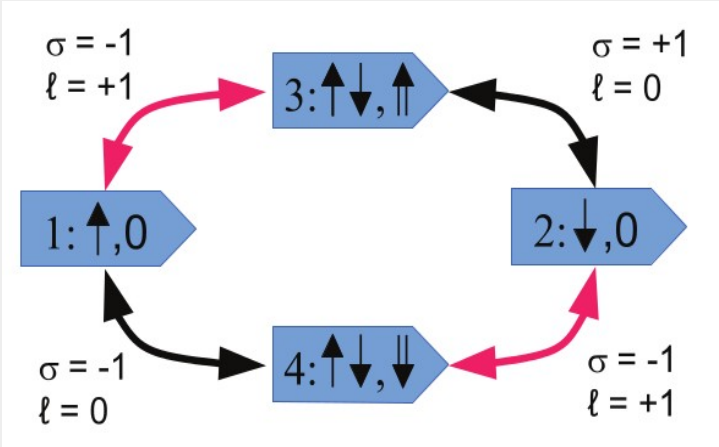


Estado inicial

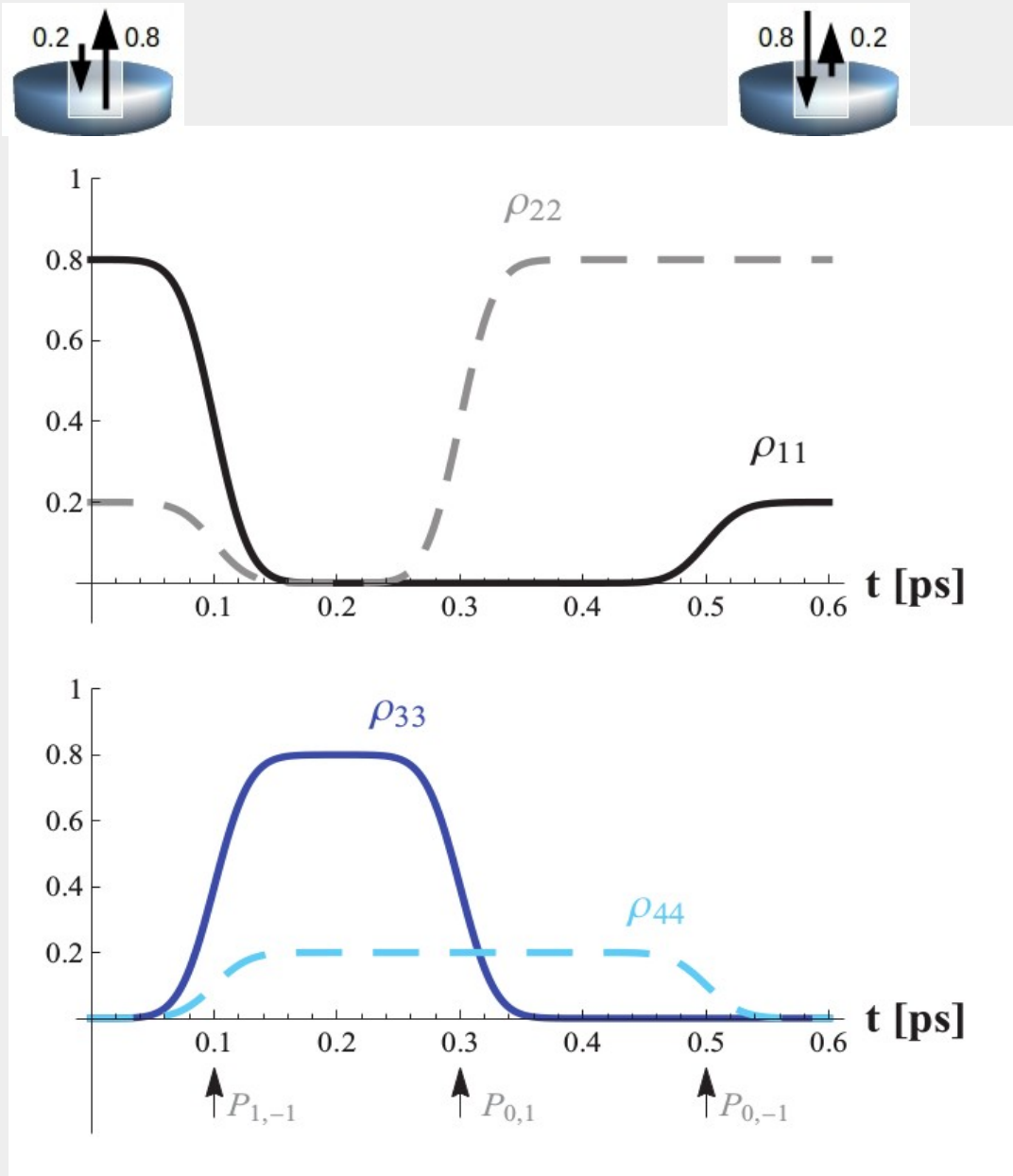
Estado final

El spin se invierte

Simulaciones numéricas

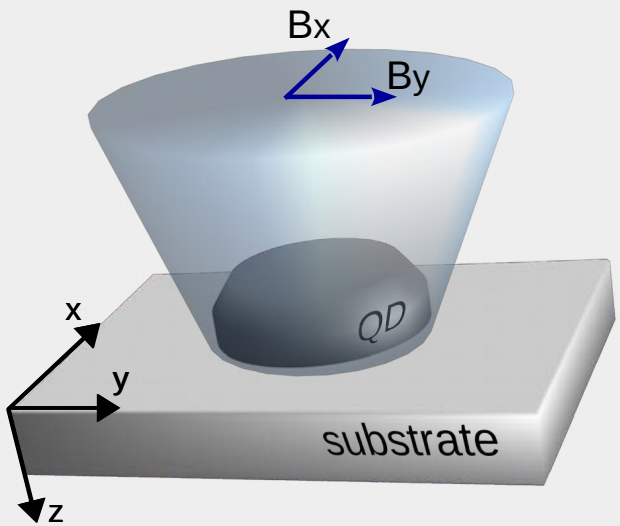


Una secuencia de 3 pulses ($P_{\ell,s}$), independiente del estado inicial del QD, invierte la componente z



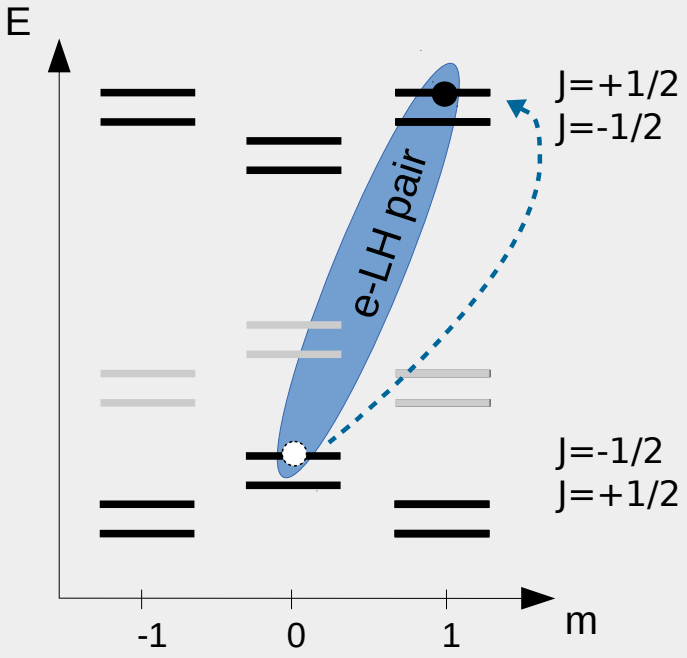
3. Campo magnético trasverso, no paraxial

$\ell = \pm 2 \quad \sigma = \mp 1$



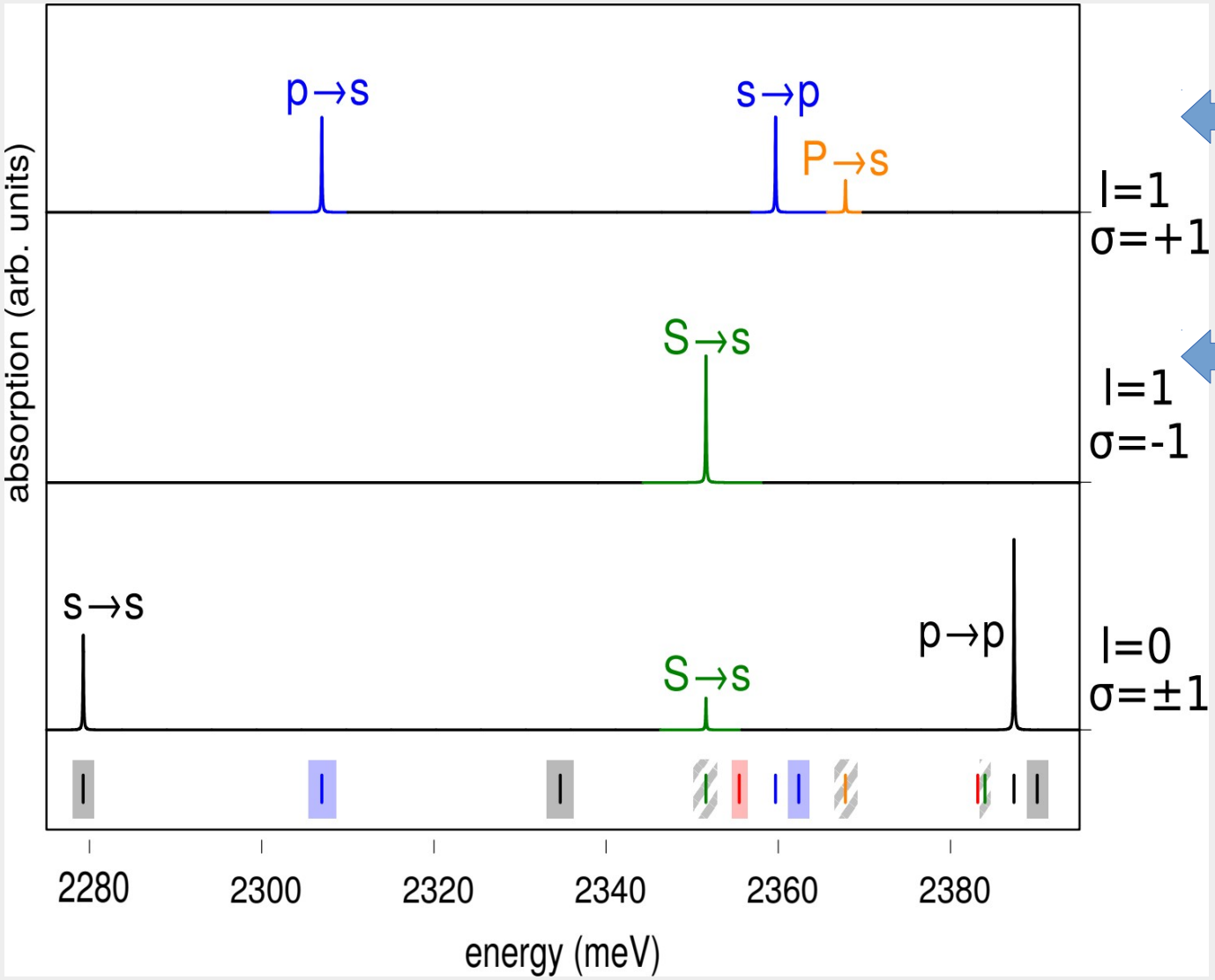
La interacción magnética es más fuerte que la eléctrica

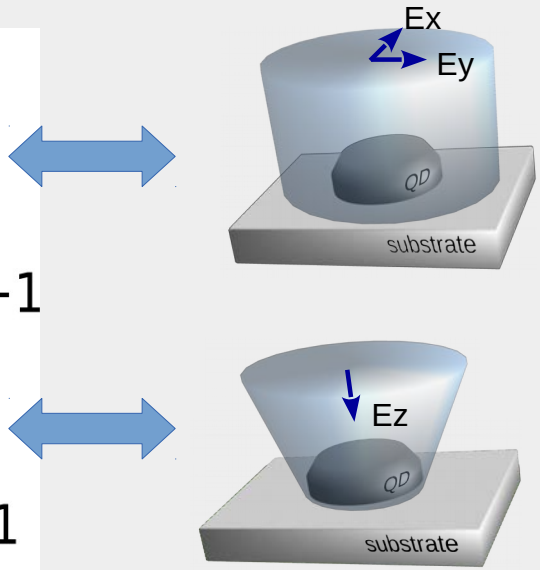
$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \sigma \frac{B_0}{2} \left(\frac{q_r}{q_z} \right)^2 \left[J_{\ell+\sigma+1}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma+1)\varphi} \mathbf{e}_- + J_{\ell+\sigma-1}(q_r r) e^{i(\ell+\sigma-1)\varphi} \mathbf{e}_+ \right]$$



e^- - light-hole pair sin momento angular microscópico (banda) pero con momento angular macroscópico (“envelope”)

Espectro



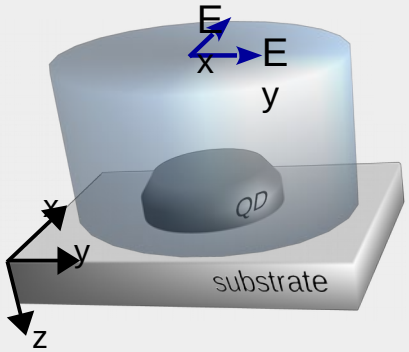


CODES
Letters: envelope function
UPPER case: LH
Lower case: HH / conduction

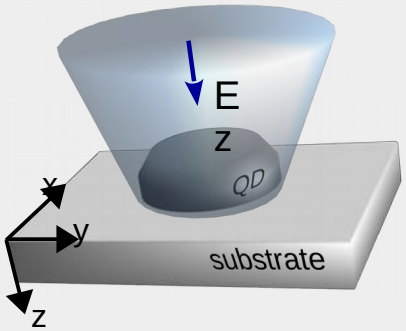
Pero los experimentos ven los sistemas reales ...

Entonces estudiamos con mayor detalle

$\ell = \pm n \quad \sigma = \pm 1$



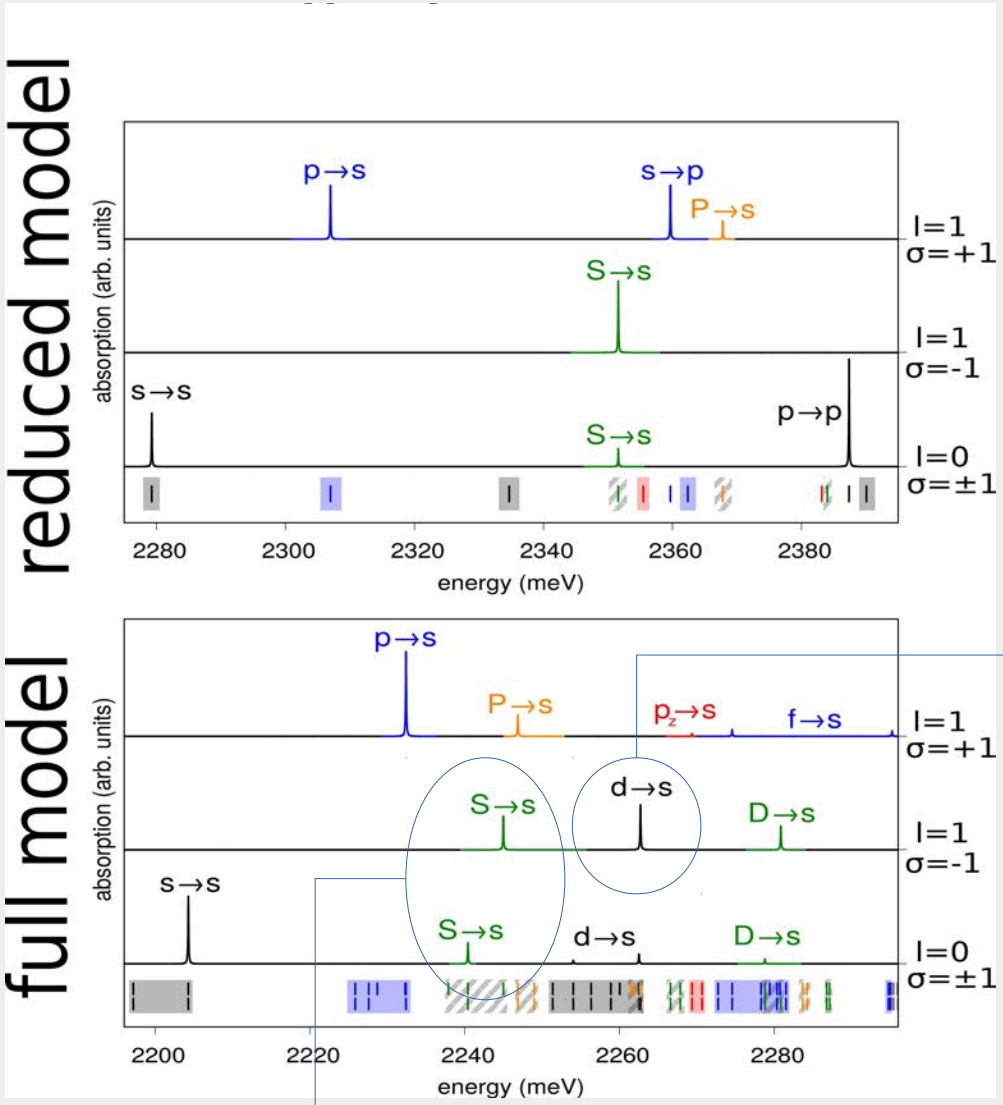
$\ell = \pm 1 \quad \sigma = \mp 1$



usando:

- Configuration Interaction
- direct Coulomb interaction
- short range exchange interaction
- valence-band mixing

Espectro más realista



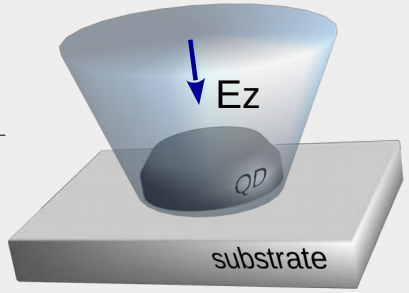
Spin-forbidden HH exciton can be excited

Spin zero LH exciton splits from normal LH exciton

Observamos

- corrimientos
- Picos prohibidos para envelope
- Picos prohibidos para spin

Aplicaciones
Almacenamiento con HH dark X [(d-s)↓⇓]



Optical vortex

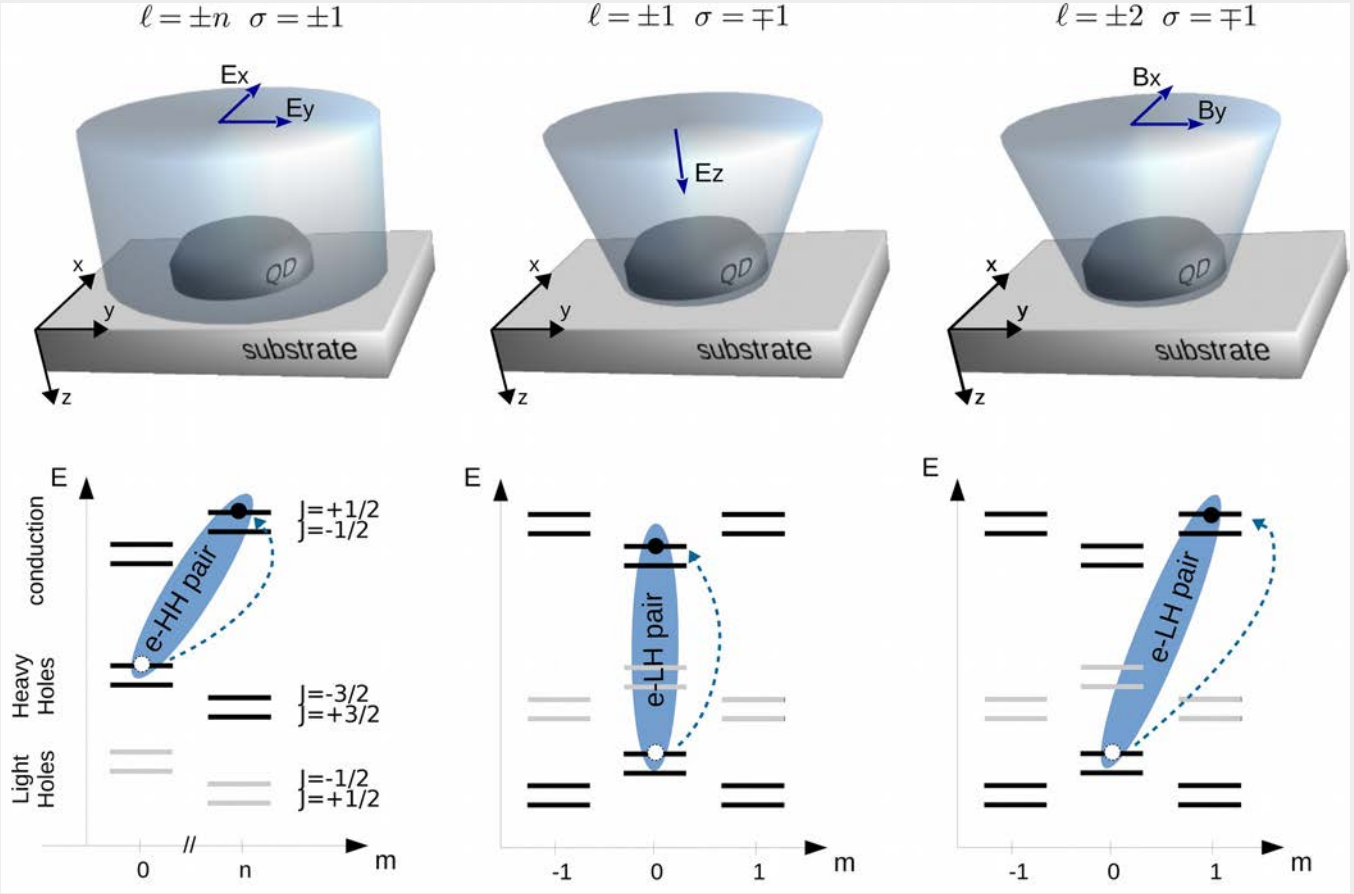
$$|d\text{-}s\rangle_{int} = \alpha(d\text{-}s)\downarrow\Downarrow + \beta(S\text{-}s)\downarrow\Uparrow$$

with phonon relaxation

$$(s\text{-}s)\downarrow\Downarrow$$

Robusto contra recombinación radiativa

CONCLUSIONES



Un único pulso de Vor. Opt. puede controlar el estado electrónico del QD de manera muy completa

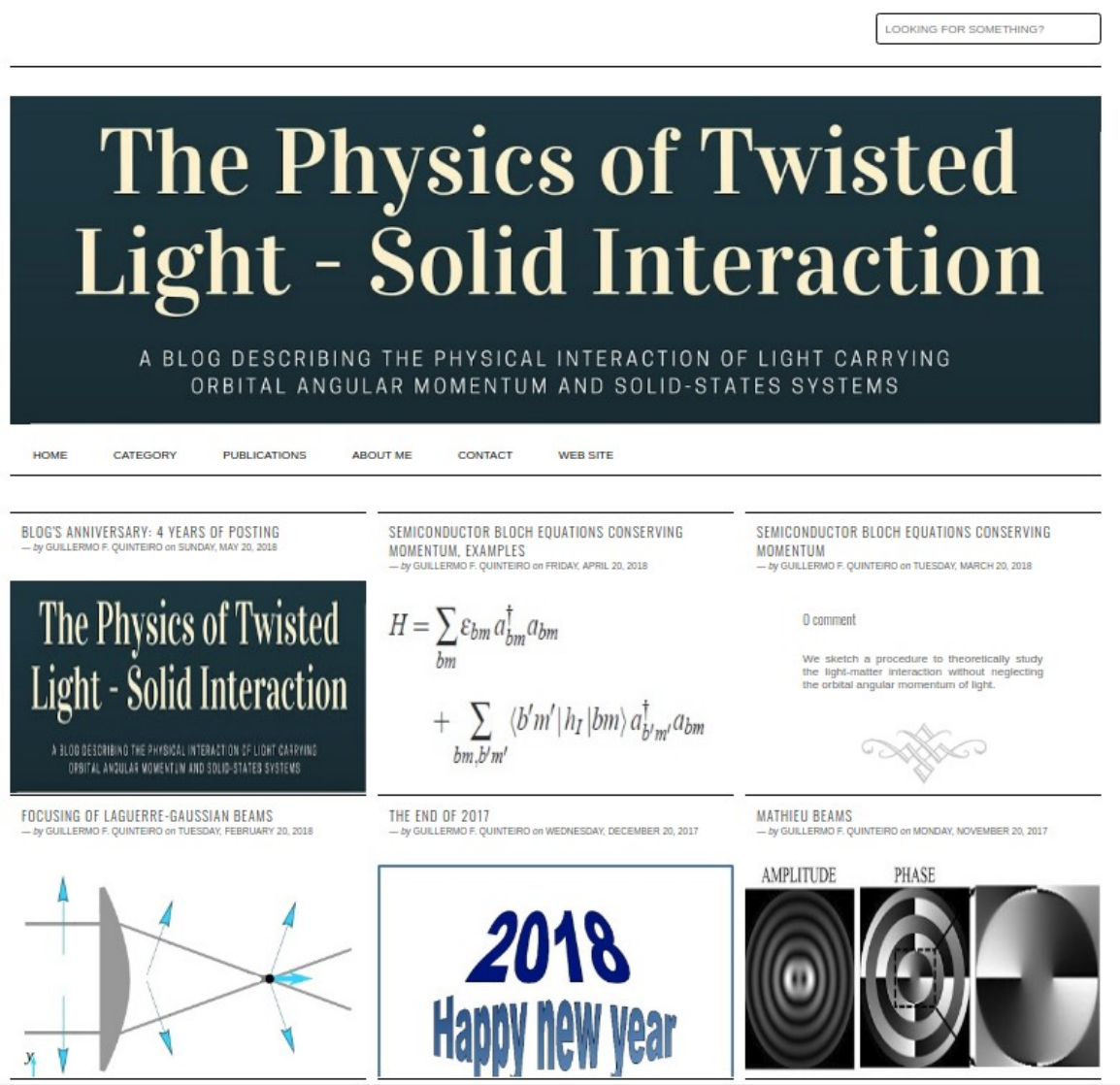
Collaboradores

- **Tilmann Kuhn**, Münster
- **Doris E. Reiter**, Münster
- **Matthias Holtkemper**, Münster
- **Ferdinand Schmidt-Kaler**, Mainz
- **Christian T. Schmiegelow**, Buenos Aires
- **Pablo I. Tamborenea**, Buenos Aires

Ayuda financiera

Office of Naval Research GLOBAL Science & Technology
USN

Más información en:



http://twistedlight-solid.blogspot.com/

SE OFRECE

TESINA DE LICENCIATURA

Y BECAS DE

DOCTORADO

POST-DOCTORADO

FINANCIADAS POR LA ONRG