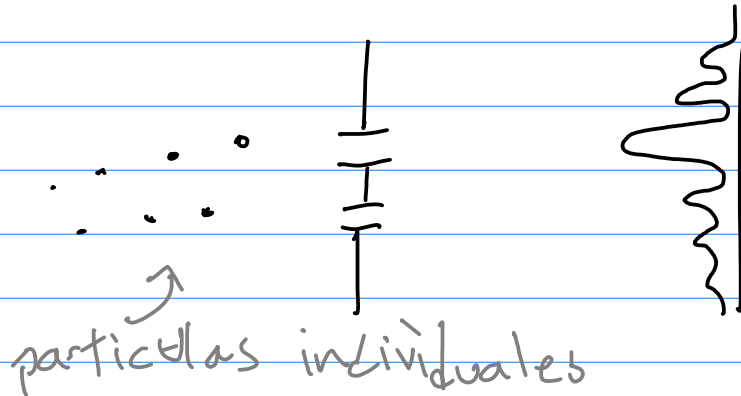


Átomos de Rydberg y Óptica cuántica

XXVIII Escuela de verano en física

- Introducción

- Experimentos pensados



- Control de sistemas individuales.

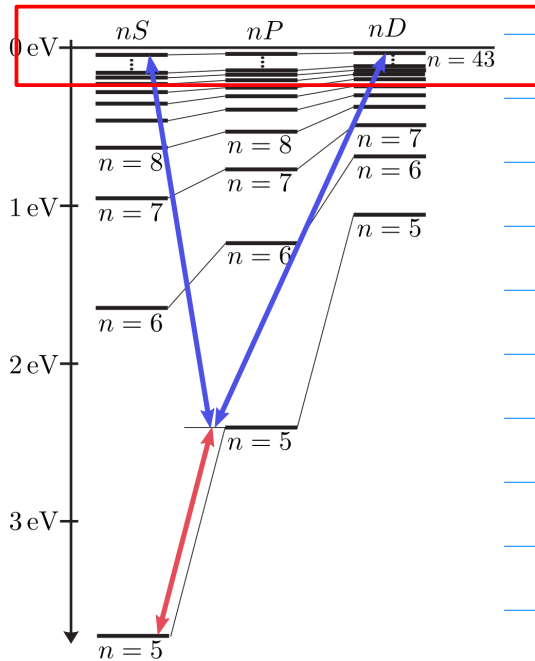
- Aprovechar enredamiento y superposición.

- Interacciones fuertes \rightarrow control individual

- Interacciones fuertes a través de estados de Rydberg.

- Átomos de Rydberg

- Átomos altamente excitados



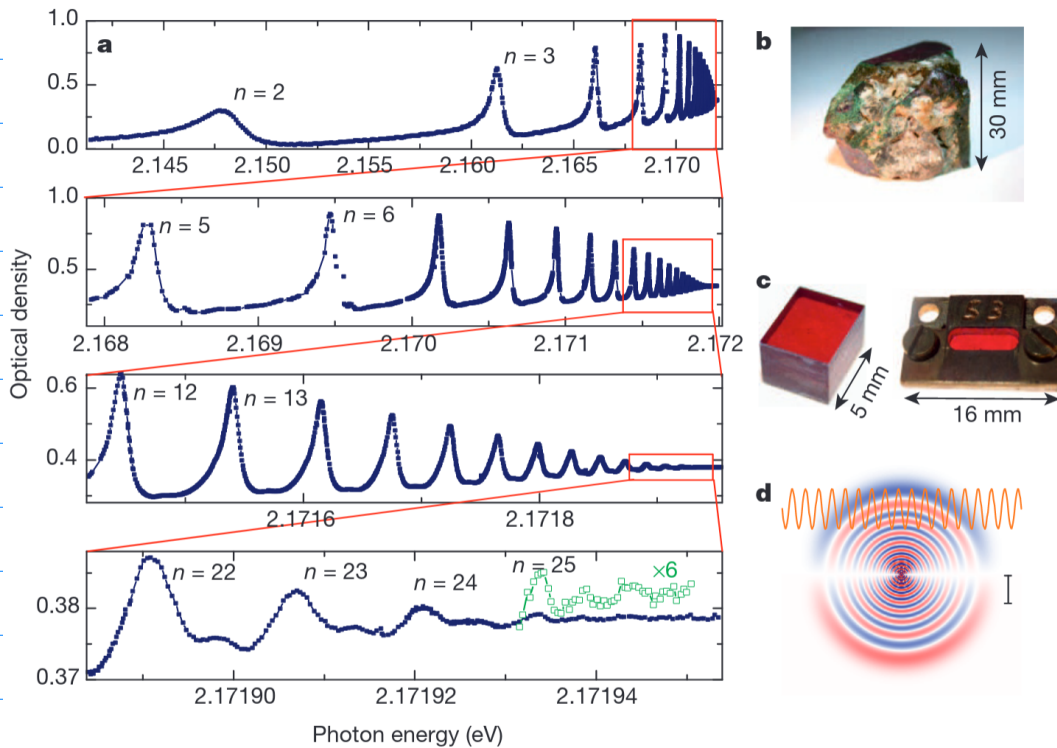
$|n, l, m_l\rangle$

$n > 20$

Rb

- ① Átomos de Rydberg solos
- ② Interacción entre átomos de Ryd.
- ③ Bloqueo de Rydberg
- ④ Óptica cuántica con átomos de Rydberg

- También dentro de sólidos como CuO_2 se pueden preparar estados de Rydberg de excitones electrón-hueco



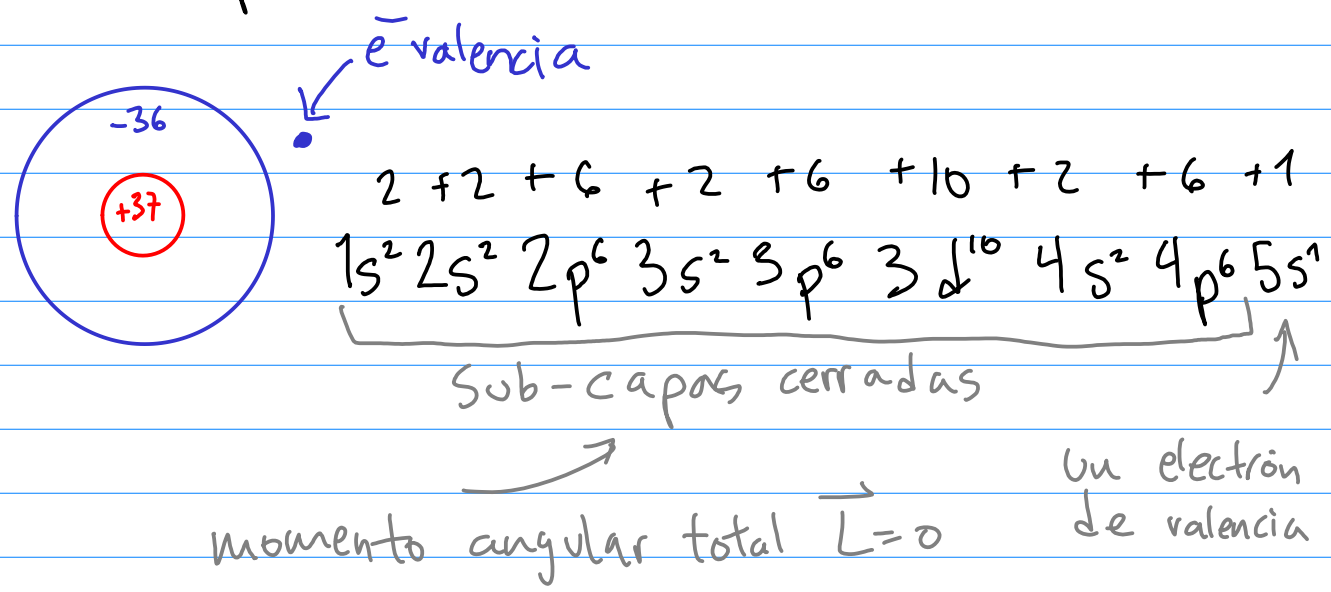
Kazimierzczuk et al., Nature 514, 343 (2014)

- Nos enfocaremos en átomos alcalinos que se pueden aproximar como problema de 2 cuerpos con buena aproximación

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb				
*	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No				

($l=0 \rightarrow s, l=1 \rightarrow p, l=2 \rightarrow d$)

- Ejemplo Rubidio (37 electrones)



- Mientras campo eléctrico \sim rango óptico (no rayos X)

- ¿Cómo escribir el estado?

- Potencial central (no relativista) (principal) principal momento angular $n=1, \dots$
 proy. de momento ang. $m=-l, \dots, l$

- relativista (espín del electrón) (fina) acoplamiento espín-orbita $S=\frac{1}{2}$
 $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ $J=|l-s|, \dots, |l+s|$
 m_j

- Efectos del núcleo espín del núcleo (hiperfina) acoplamiento $\frac{I}{F}$
 $\sim \vec{I} \cdot \vec{J}$ $\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$
 espín nuclear

Los estados tienen esta forma

$$|n l s j \Gamma F M_F\rangle$$

- Las energías

Para hidrógeno

$$E_n = - \frac{hc R_{\infty}}{n^2}$$

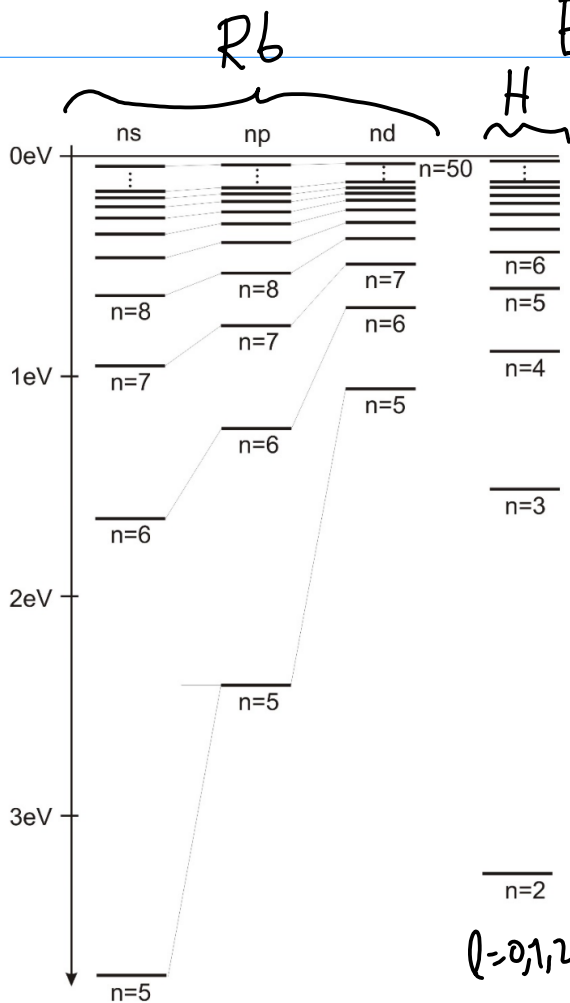
Constante de Rydberg

Para átomos alcalinos

$$E_n = - \frac{hc R_{\infty}^*}{(n - \delta_{ljF})^2}$$

Constante de Rydberg modificada

defecto Cuántico



Para r pequeño

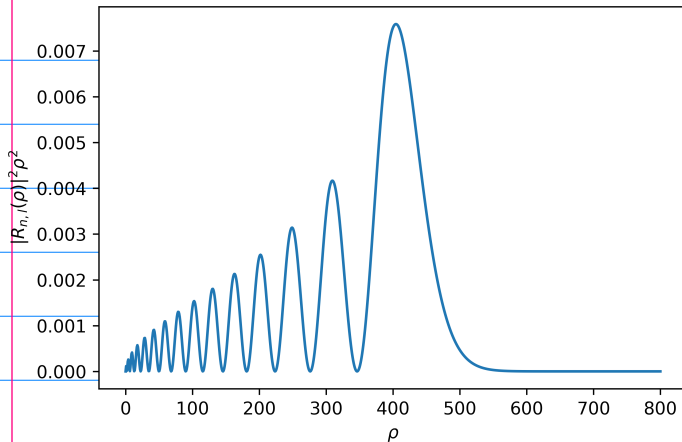
$$V(r) \approx - \frac{36e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Para r grande $V(r) = - \frac{Z(r)e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$

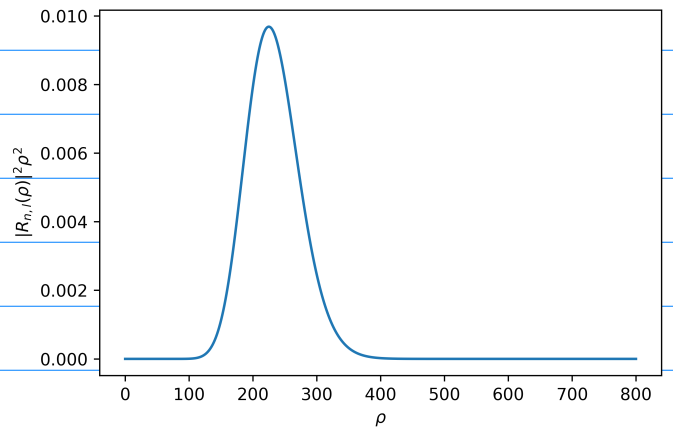
$$V(r) \approx - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$l=0,1,2, \dots$

$n=15, l=0$



$n=15, l=14$



Para conocer las funciones de onda del Rb.

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r)\right) \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r})$$

Con argumentos físicos se propone un potencial modelo

medimos las energías

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r)\right) \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r})$$

obtenemos $E_{\vec{\alpha}}, \psi_{\vec{\alpha}}(\vec{r})$ $\vec{\alpha} = (n, l, s, j, I, F, m_F)$

Comparación

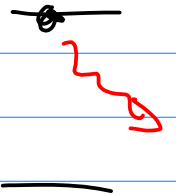
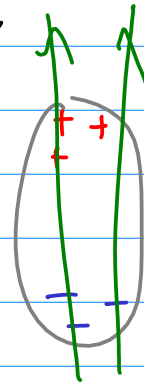
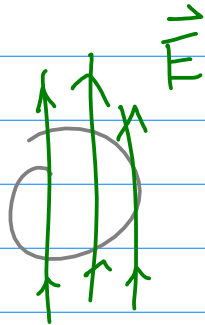
repetir hasta que la comparación coincida

Podemos concluir

$$\text{Tamaño} \sim n^2$$

$$\text{Vida media} \sim n^3$$

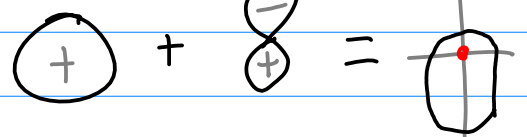
$$\text{Polarizabilidad} \sim n^7$$



$|S\rangle$

Polarizabilidad

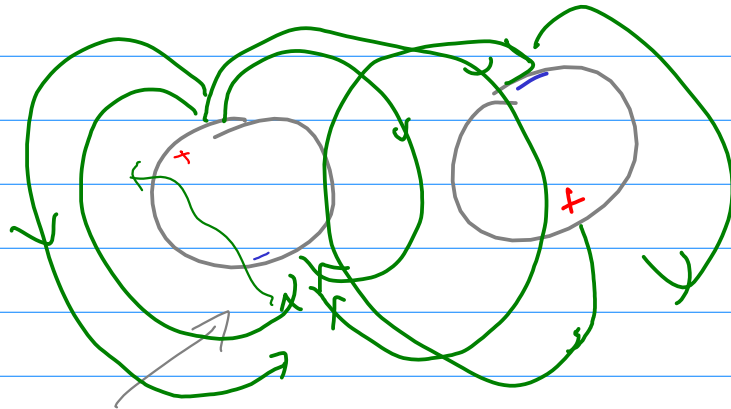
$$\alpha |S\rangle + \beta |P\rangle + \dots$$



$$\vec{d} = \frac{1}{2} \alpha \vec{E}$$

Interacción entre átomos de Rydberg

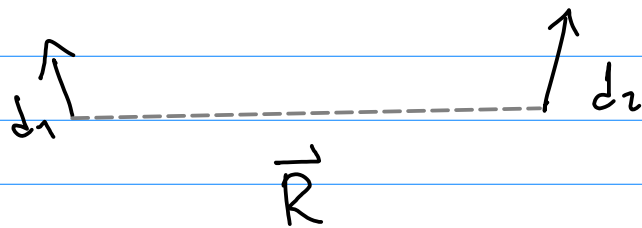
Interacción de van der Waals.



Fluctuación
de campo eléctrico

Interacción dipolo-dipolo

$$H_{dd} = \frac{d_1 d_2 - 3(\vec{d}_1 \cdot \hat{R})(\vec{d}_2 \cdot \hat{R})}{R^3}$$



$$|n_1, l_1, s_1, j_1, I_1, F_1, M_{F_1}\rangle \otimes |n_2, l_2, s_2, j_2, I_2, F_2, M_{F_2}\rangle$$

$= |\alpha\beta\rangle$

$$\Delta E(R) = \langle \alpha\beta | H_{dd}(R) | \alpha\beta \rangle = 0$$

Si nos fijamos en el primer término:

$$\langle \alpha \beta | d_1 \cdot d_2 | \alpha \beta \rangle = \langle \alpha | d_1 | \alpha \rangle \cdot \langle \beta | d_2 | \beta \rangle$$

d tiene la misma paridad que α

No hay dipolo a primer orden. Hay que calcular a segundo orden para obtener valor distinto de cero

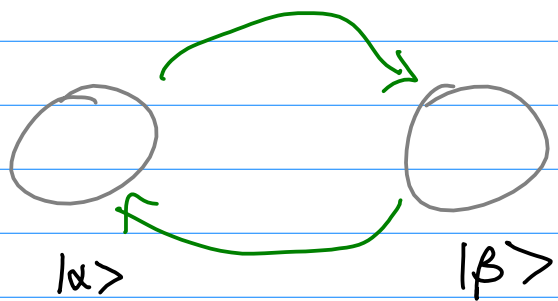
$$\Delta E_{\alpha\beta}^{(2)}(R) = \sum_{\mu\nu} \frac{|\langle \alpha\beta | H_{dd}(R) | \mu\nu \rangle|^2}{E_{\alpha\beta} - E_{\mu\nu}}$$

$$= \frac{1}{R^6} \sum_{\mu\nu} \frac{|\langle \alpha\beta | \vec{d}_1 \cdot \vec{d}_2 - 3(\vec{d}_1 \cdot \hat{R})(\vec{d}_2 \cdot \hat{R}) | \mu\nu \rangle|^2}{E_{\alpha\beta} - E_{\mu\nu}}$$

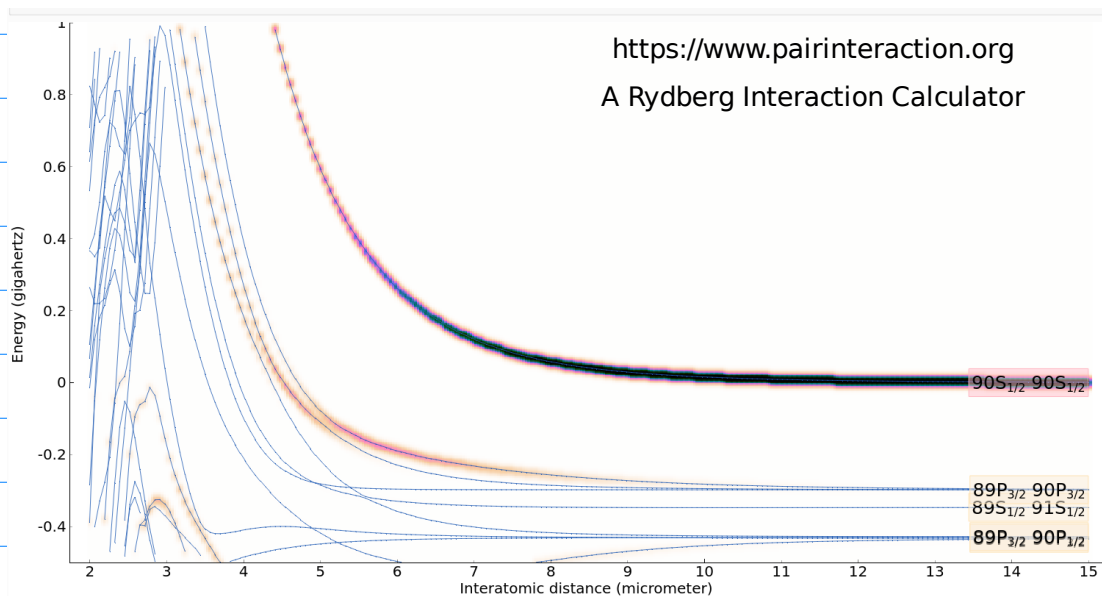
$$= \frac{C_6}{R^6} \quad (C_6 \sim n^{11})$$

$$H_{dd} = \frac{\vec{d}_1 \cdot \vec{d}_2 - 3(\vec{d}_1 \cdot \hat{R})(\vec{d}_2 \cdot \hat{R})}{R^3}$$

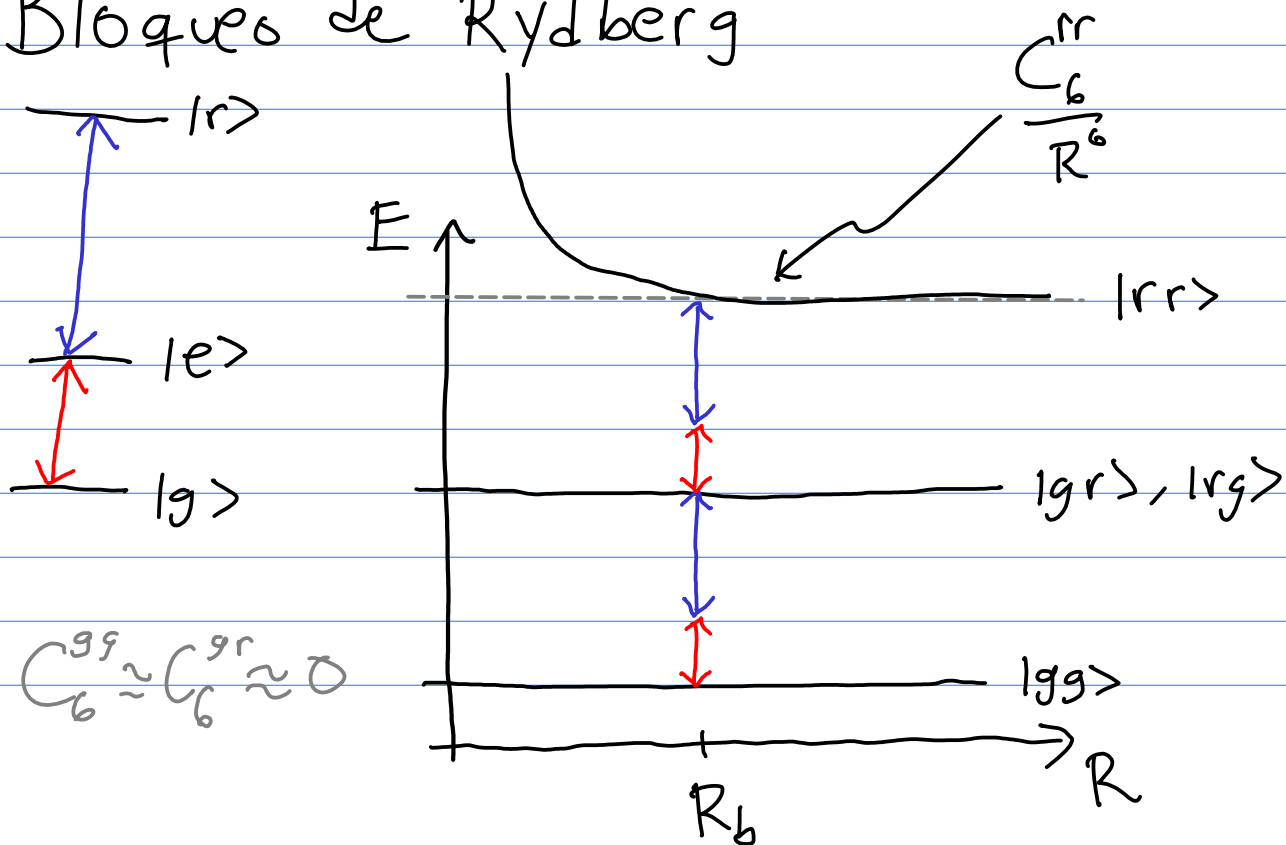
Interacció n v d W



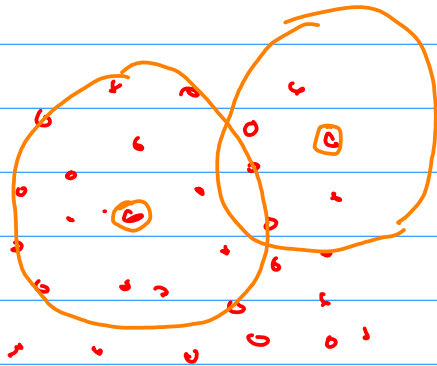
$$\Delta E_{\alpha\beta}(R) = \frac{C_6^{\alpha\beta}}{R^6}$$



Bloques de Rydberg



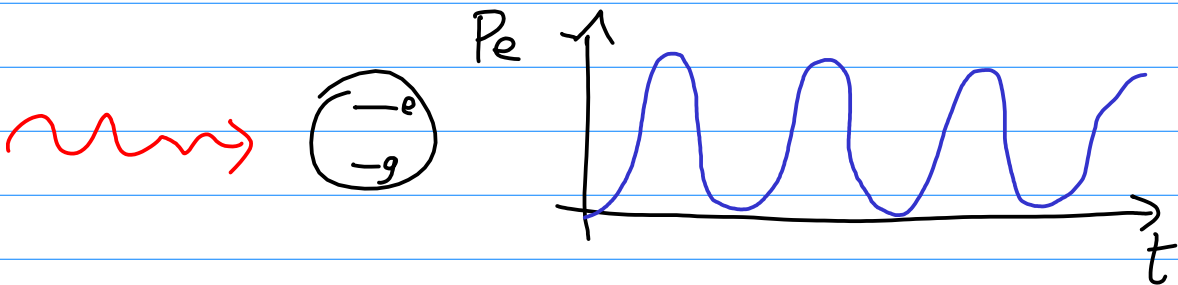
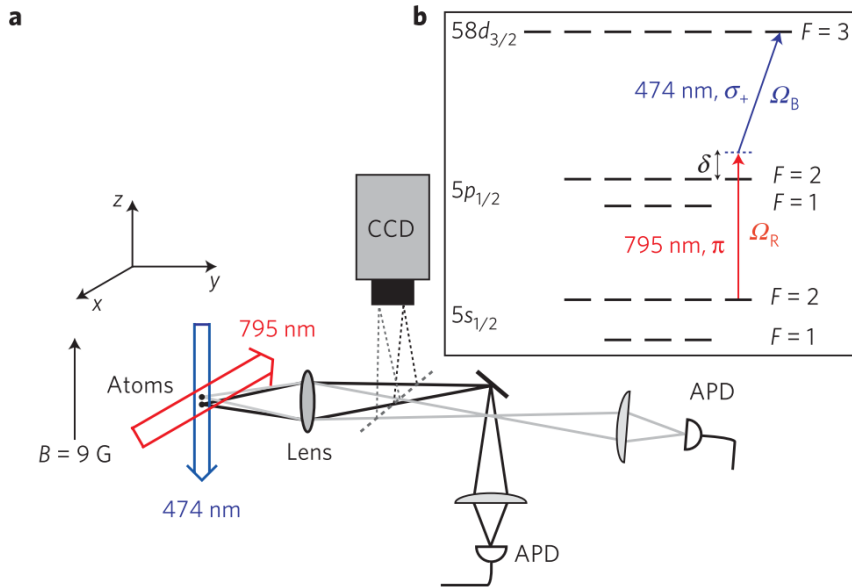
- Debido a la interacción de van der Waals, existe una distancia R_0 abajo de la cual sólo se puede excitar un átomo a estado de Rydberg.



1 átomo de Rydberg afecta las propiedades ópticas de $\sim 10,000$ átomos cercanos.

Experimentos de bloqueo de Rydberg

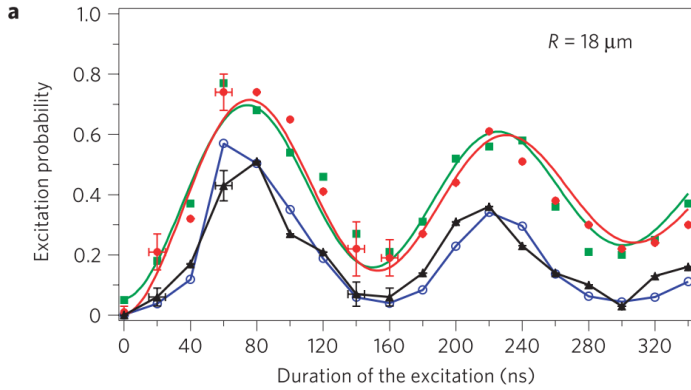
Gaëtan et.al, Nature Physics volume 5, pages 115-118 (2009)



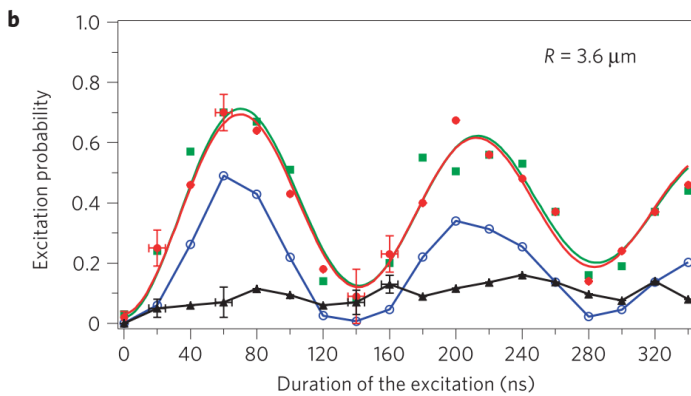
- absorción \rightsquigarrow

- emisión espontánea

- emisión estimulada

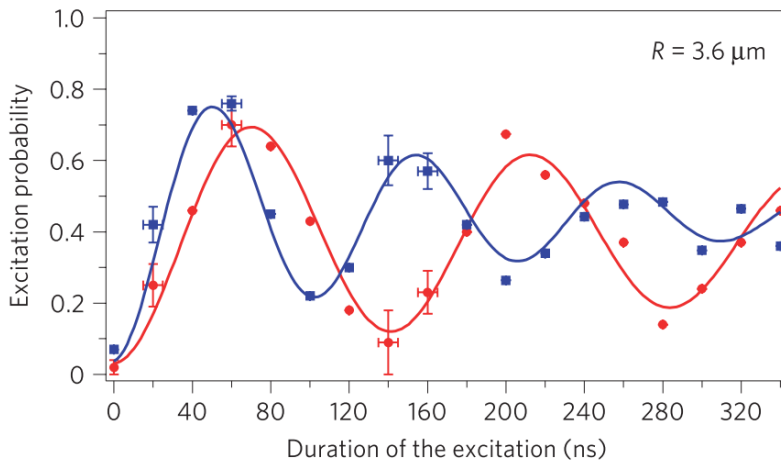


átomo excitado sólo en A
 átomo excitado sólo en B
 átomo excitado en A y en B



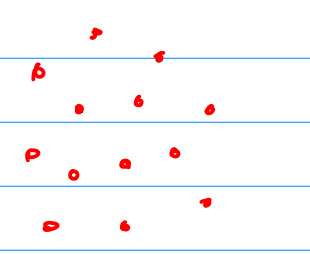
Prob de excitar un átomo cuando está solo.

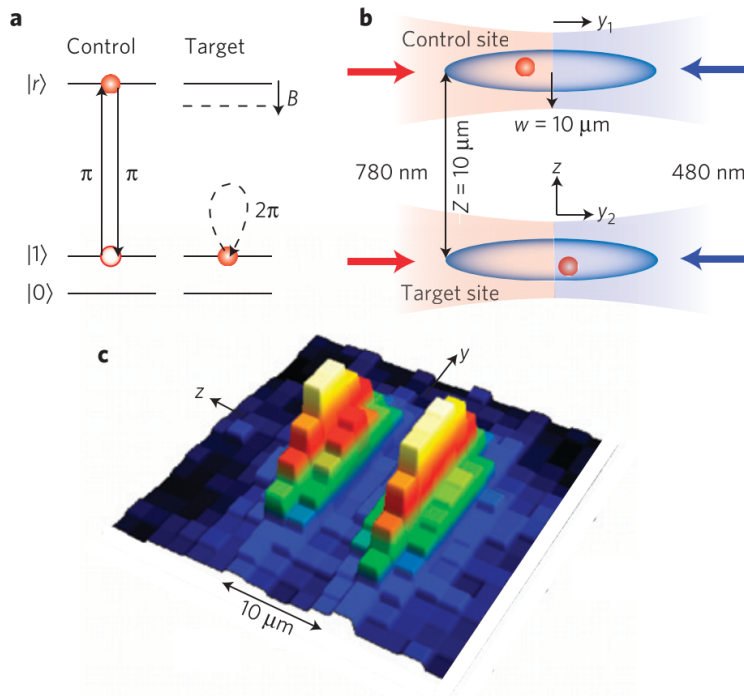
Prob de excitar algún átomo cuando ambos sitios están ocupados.



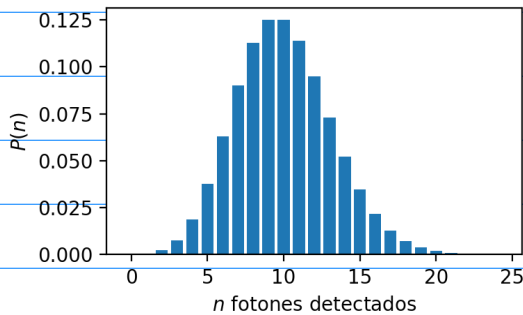
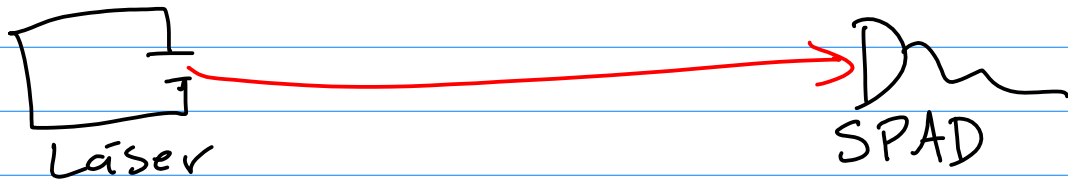
Estado excitado

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

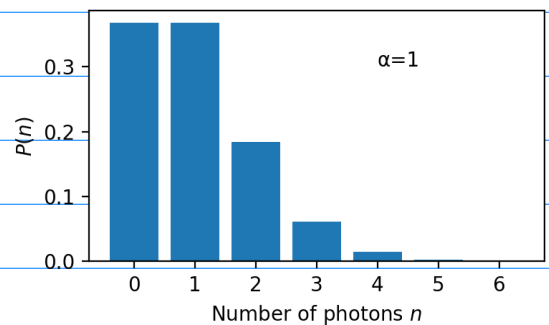




Fuente de fotones individuales
Para un láser

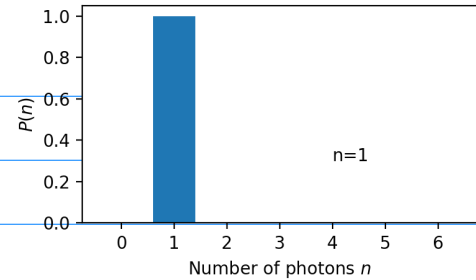


Distribución
de Poisson

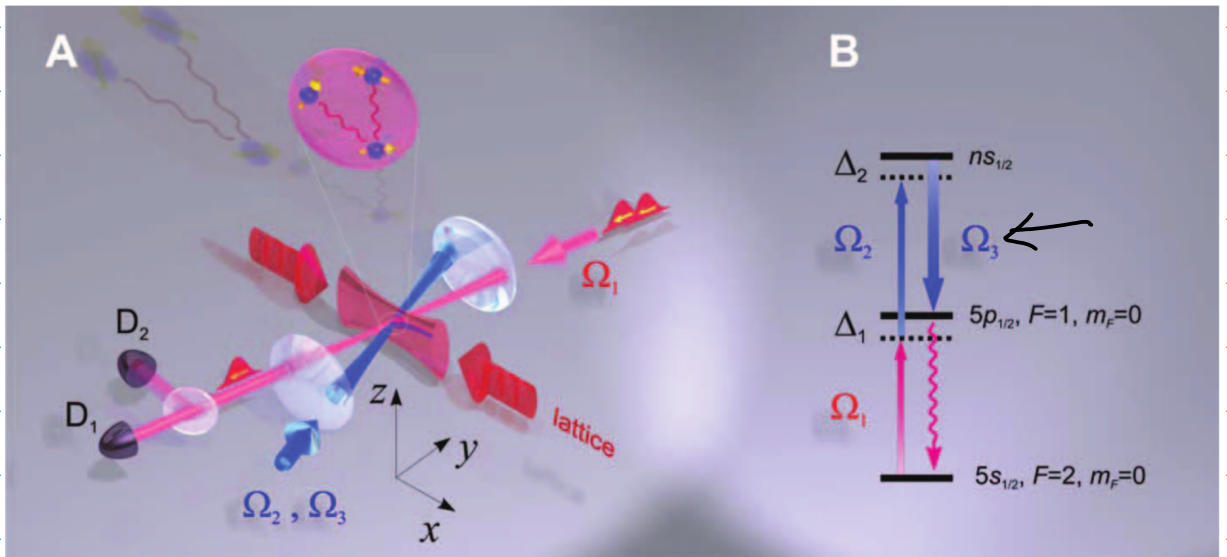


Láser atenuado

Fotones individuales



Y. O. Dudin, A. Kuzmich
DOI: 10.1126/science.1217901



Empacar átomos en un tamaño menor que el radio de bloqueo.

Radio de bloqueo $0.001\mu\text{m} - 20\mu\text{m}$
($n \sim 5$) ($n \sim 120$)

Conclusiones

- Átomos de Rydberg: Características exageradas.
 - Tamaño
 - Vida media
 - Polarizabilidad \rightarrow Interacción
- Bloqueo \rightarrow Aislamiento y amplificación