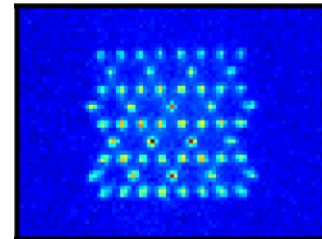
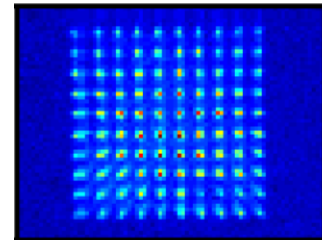
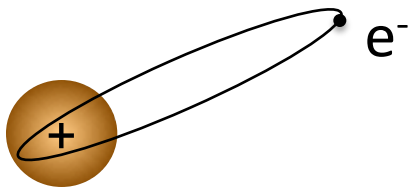


Le Cirque Quantique, ou comment dompter quelques atomes avec des lasers

Antoine Browaeys
Institut d'Optique, CNRS



Conférence, lycée Hoche, 7 octobre 2015

Manipulation de particules individuelles: Le point de vue d'un père fondateur...

..., nous ne faisons **jamais** d'expériences avec **juste un** électron, un atome ou une (petite) molécule. Dans des expériences de pensée, nous supposons parfois que nous le faisons ; cela conduit invariablement à des conséquences **ridicules**.



E. Schrödinger
British Journal of the Philosophy
of Science III (10), (1952)

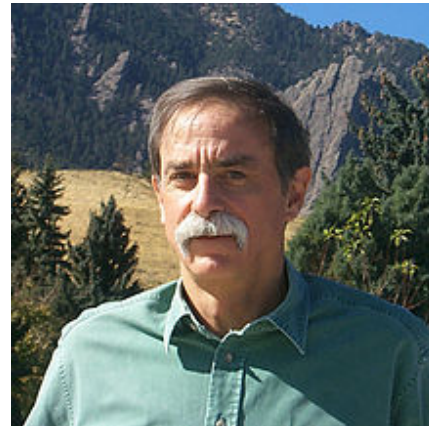
60 ans plus tard...



2012



S. Haroche (France)



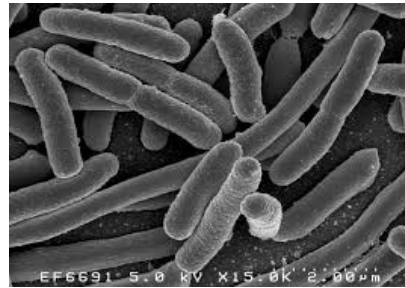
D. Wineland (USA)

**« pour le développements de méthodes
expérimentales permettant de mesurer et de
manipuler des systèmes quantiques individuels »**

Les bêtes à dompter : les atomes

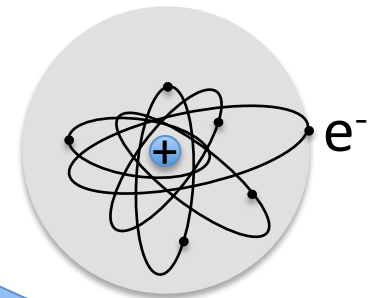


1 mm



Bactéries

1 μm



0.1 nm

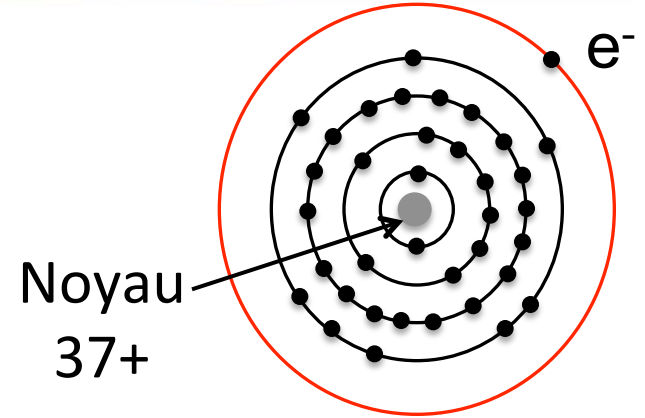


Ampoule de Rubidium

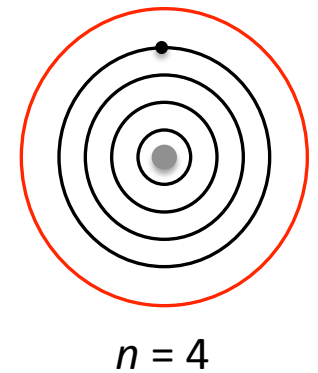
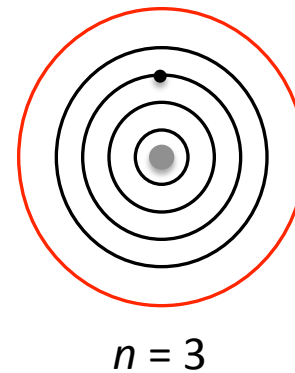
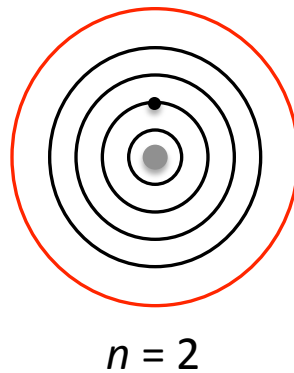
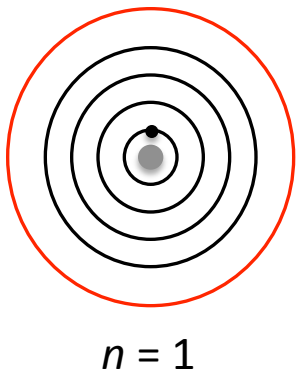
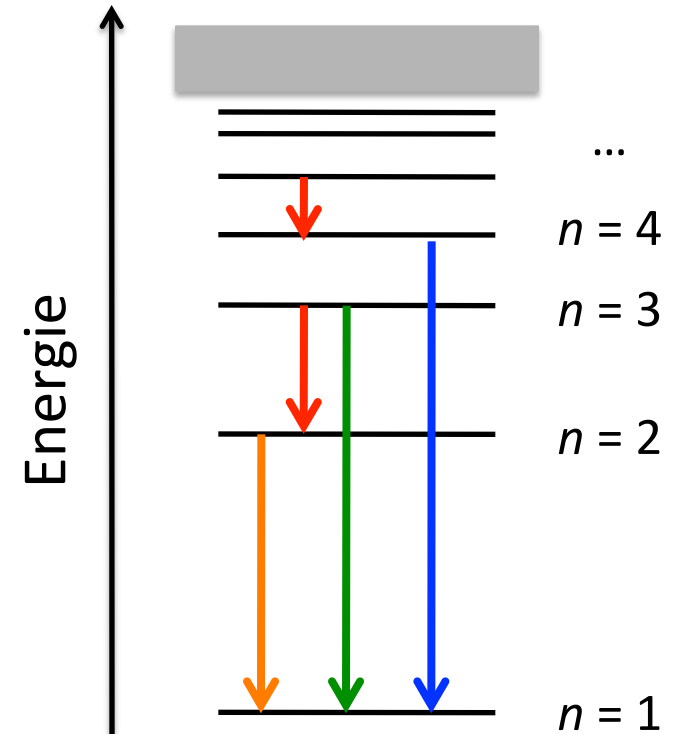
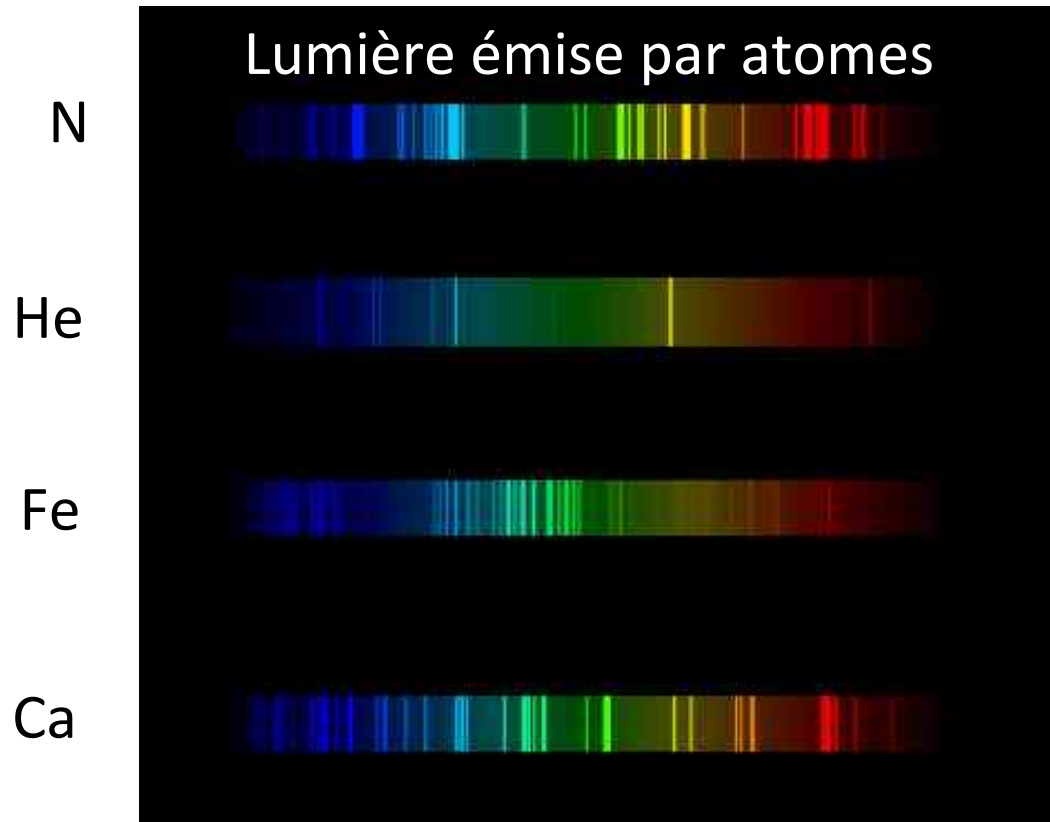
1	1																	2
1	H 1.0079																	He 4.0026
2	3	4															10	
2	Li 6.941	Be 9.0122															Ne 20.180	
3	11	12											13	14	15	16	17	18
3	Na 22.990	Mg 24.305											Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.065	Cl 35.453	Ar 39.948
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4	K 39.098	Ca 40.078	Sc 44.956	Ti 47.867	V 50.942	Cr 51.996	Mn 54.938	Fe 55.845	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.39	Ga 69.723	Ge 72.64	As 74.922	Se 78.96	Br 79.904	Kr 83.80
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
5	Rb 85.468	Sr 87.62	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.94	Tc (98)	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.60	I 126.90	Xe 131.29
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
6	Cs 132.91	Ba 137.33	La-Lu	Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po (209)	At (210)	Rn (222)
7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112						
7	Fr (223)	Ra (226)	Ac-Lr	Rf (261)	Db (262)	Sg (266)	Bh (264)	Hs (277)	Mt (268)	Uun (281)	Uuu (272)	Uub (285)						

Rubidium (37 e⁻)

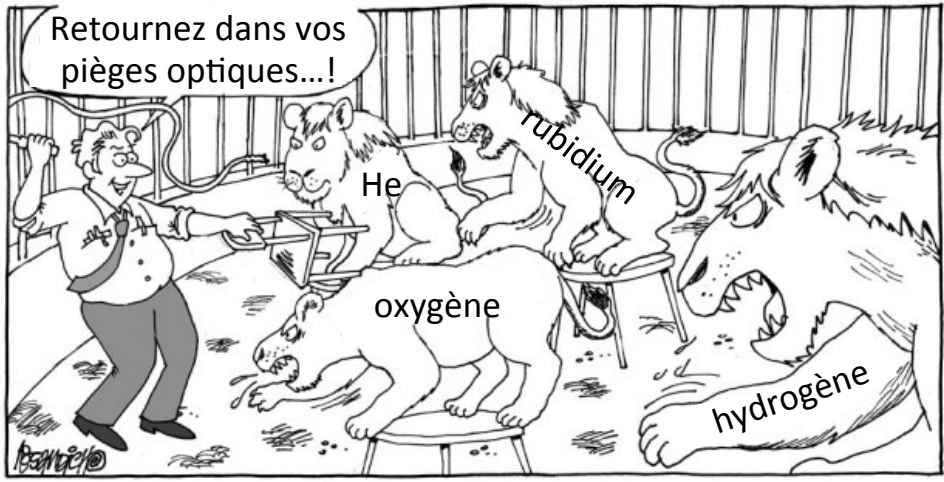
Physique quantique ⇒
électrons se répartissent en **couches**



Les niveaux d'énergie des atomes



Le dompteur et son fouet laser...

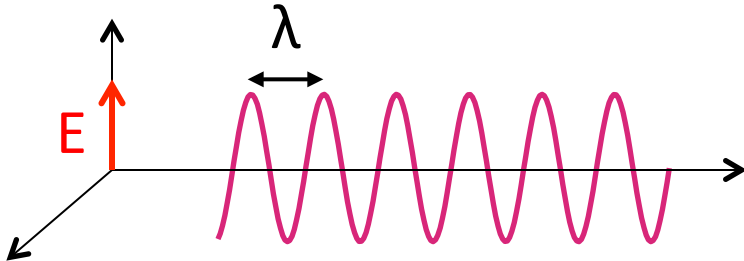


Lasers: pour piéger et refroidir
pour « voir »
pour manipuler...

Le laser de deux points de vue différents...



Onde électromagnétique

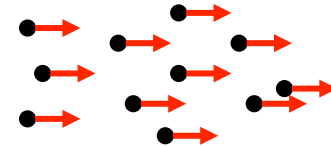


Fréquence (couleur): ν

$\nu \sim 10^{15}$ Hz, $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$

Flux de particules

Photons (Einstein, 1905)

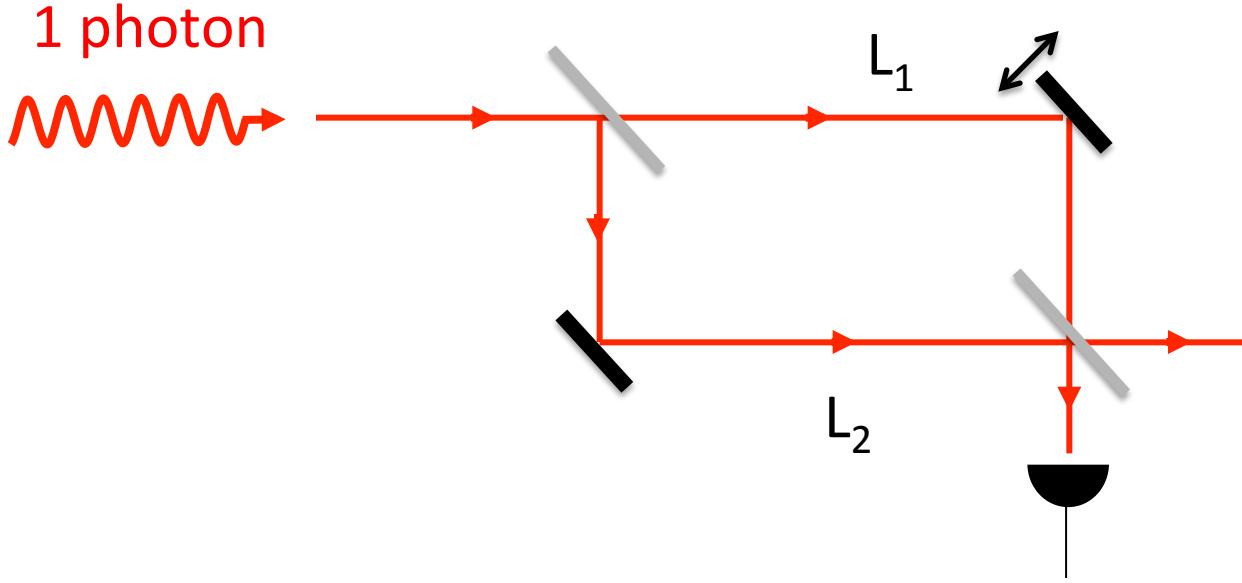


$$E = h\nu$$

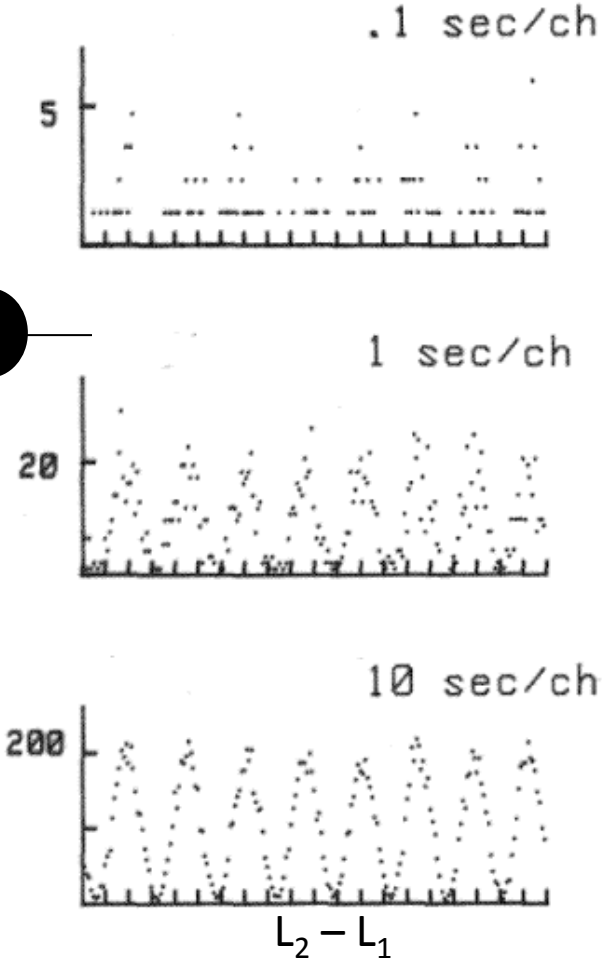
Les concepts quantiques
« ridicules » de
Mr Schrödinger

Un objet **quantique** peut être dans plusieurs états **à la fois** ...

Exemple 1: un photon peut suivre 2 chemins à la fois...



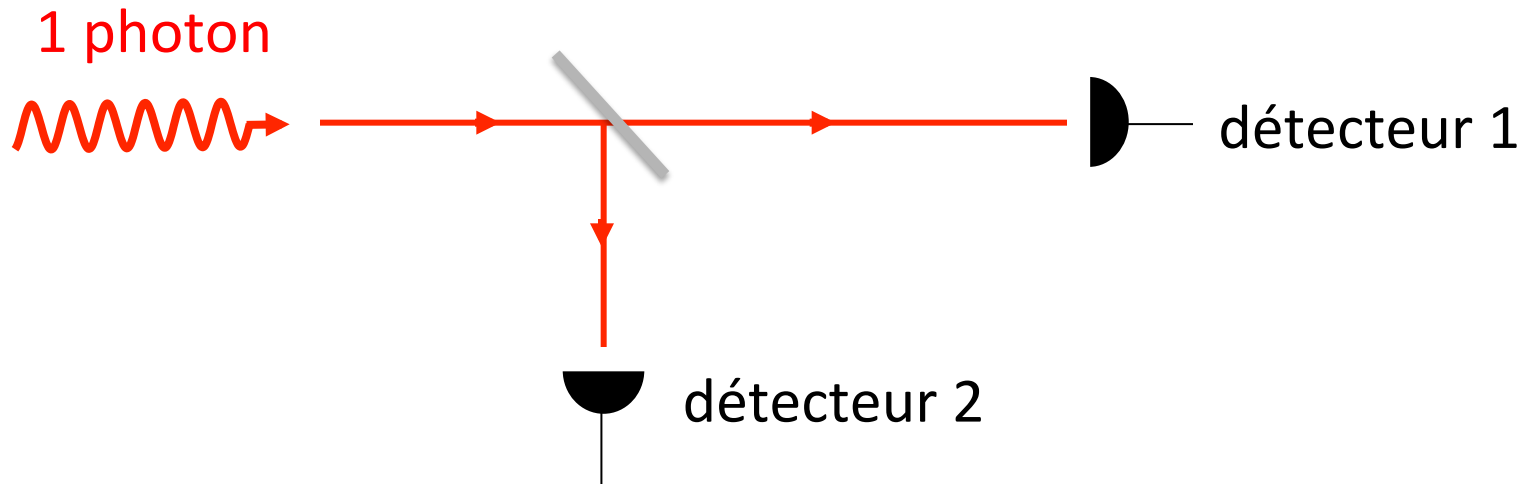
Grangier, Aspect (1986)



Oscillations (**interférences**)
⇒ photon réfléchi **ET** transmis...

Un objet **quantique** peut être dans plusieurs états **à la fois** ...

Exemple 1: un photon peut suivre 2 chemins à la fois...

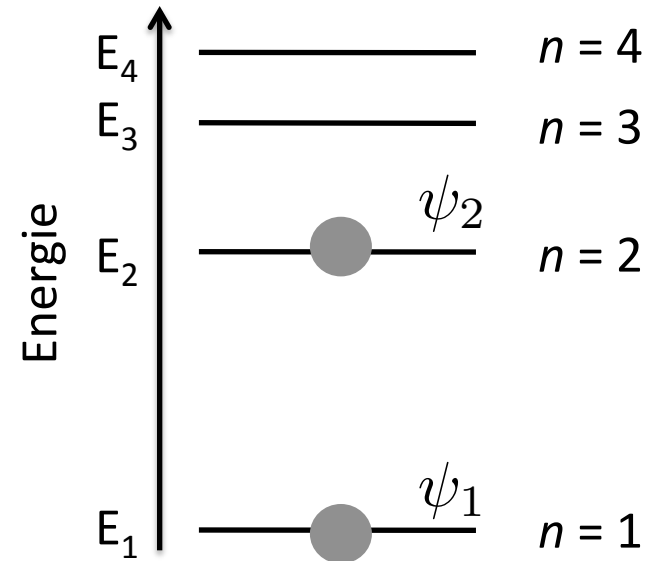
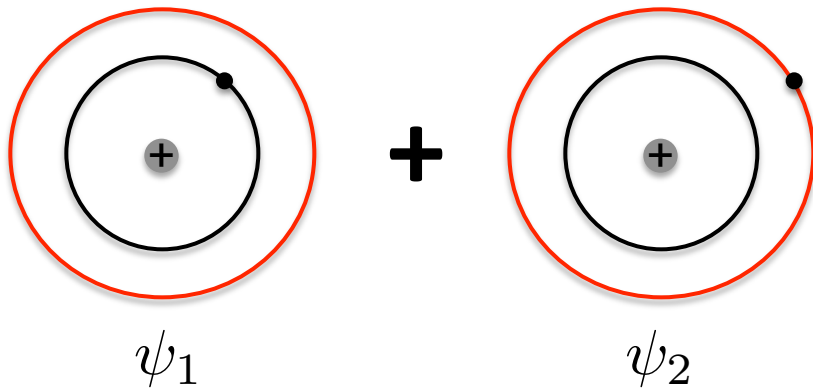


JAMAIS 2 « clics » à la fois \Rightarrow réfléchi **OU** transmis

2 photons préparés de façon identique « cliquent »
aléatoirement en 1 ou 2... \Rightarrow **probabiliste!**

Un objet **quantique** peut être dans plusieurs états **à la fois** ...

Exemple 2: un atome peut être dans 2 états à la fois...



MAIS quand on mesure énergie \Rightarrow **une seule valeur E_1 OU E_2 ...**

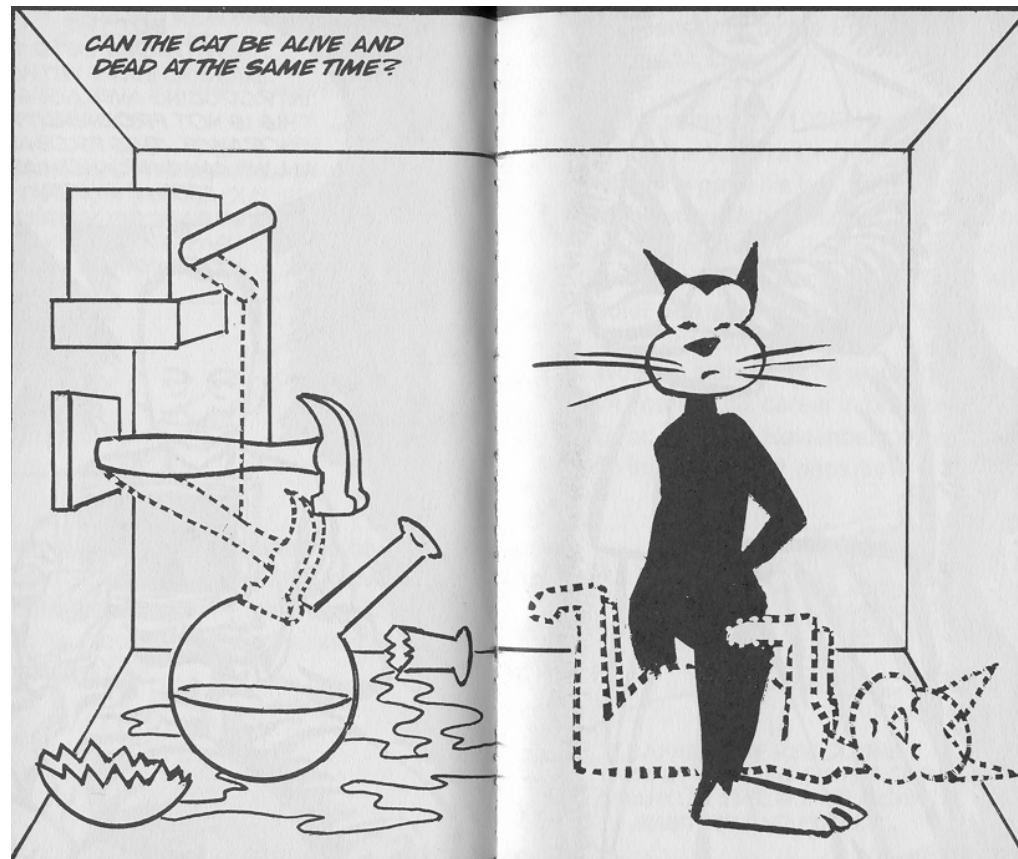
Le « ridicule » quantique : résumé

1. Un objet **quantique** peut être dans plusieurs « états » **à la fois** ...
2. **Mesure** \Rightarrow un seul des « états »
3. On ne sait a priori pas lequel... \Rightarrow **probabiliste**

Le « ridicule » ultime : le chat de Schrödinger

Si tout objet est quantique, on doit pouvoir trouver un chat

A LA FOIS Mort **ET** Vivant !!!!



La préhistoire du piégeage de particules individuelles



L'électron unique de Hans Dehmelt

VOLUME 31

19 NOVEMBER 1973

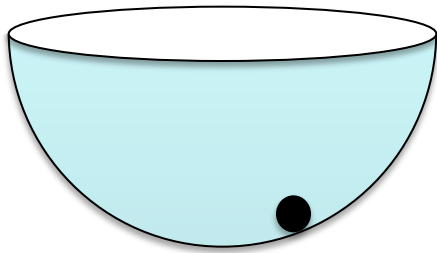
NUMBER 21

Monoelectron Oscillator

D. Wineland, P. Ekstrom, and H. Dehmelt

Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195

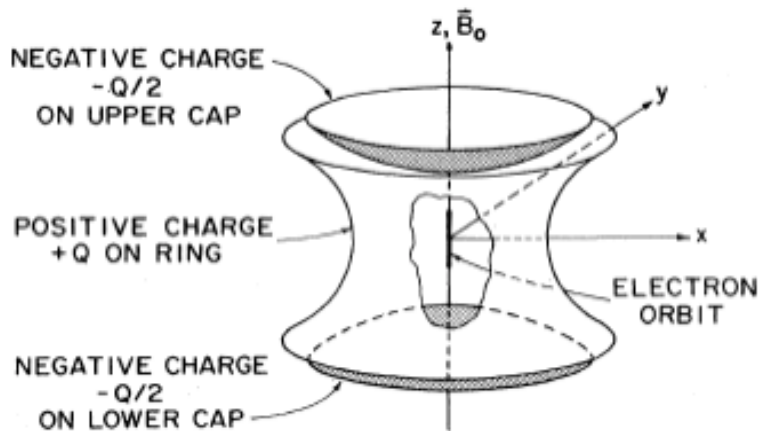
(Received 13 August 1973)



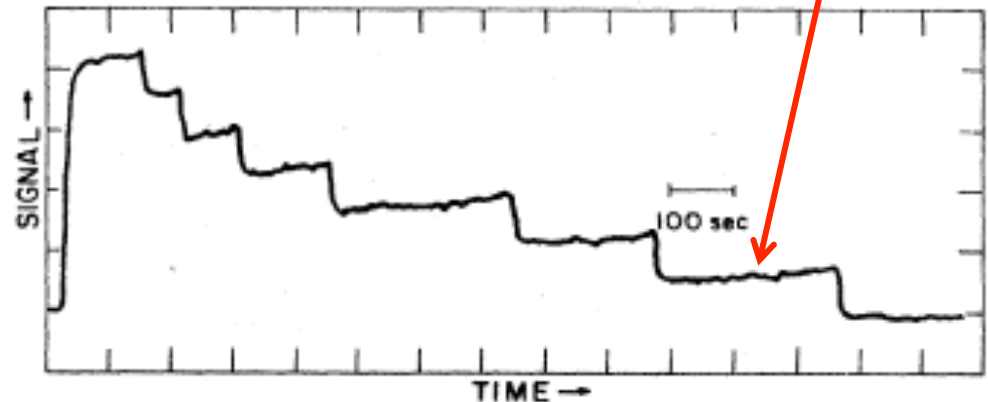
Profondeur

Piège si Energie < Profondeur

« Bol électromagnétique »: force de Lorentz $\mathbf{f} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$



Electron unique



Piéger des particules individuelles : pour quoi faire ?

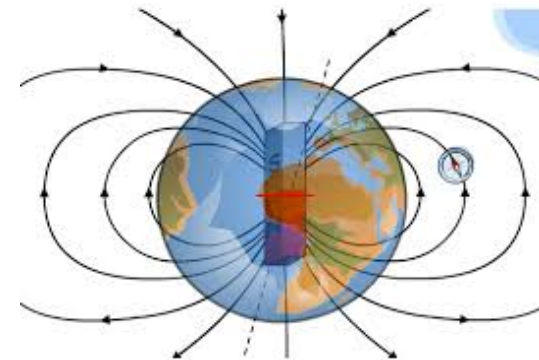
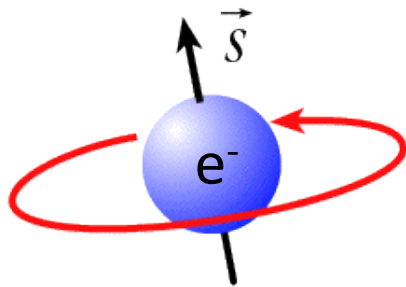
Pas de perturbation par autres particules

+

Mesurer pendant longtemps

⇒ Mesure **précise** des propriétés **intrinsèques**

Mesure du moment magnétique de l'électron (1977)



$$\frac{\mu_{\text{exp}}}{2\mu_{\text{B}}} = 1.001\ 159\ 652\ 188(4)$$

$$\frac{\mu_{\text{theo}}}{2\mu_{\text{B}}} = 1.001\ 159\ 652\ 133(29)$$



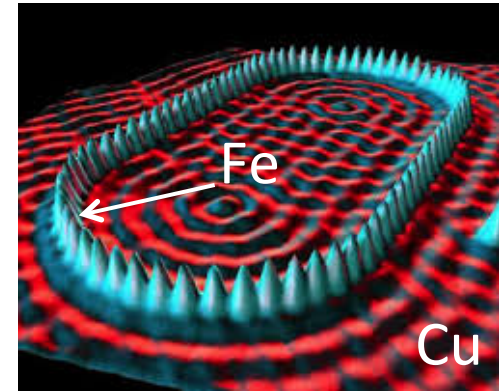
1989

Piéger et « voir » quelques
atomes

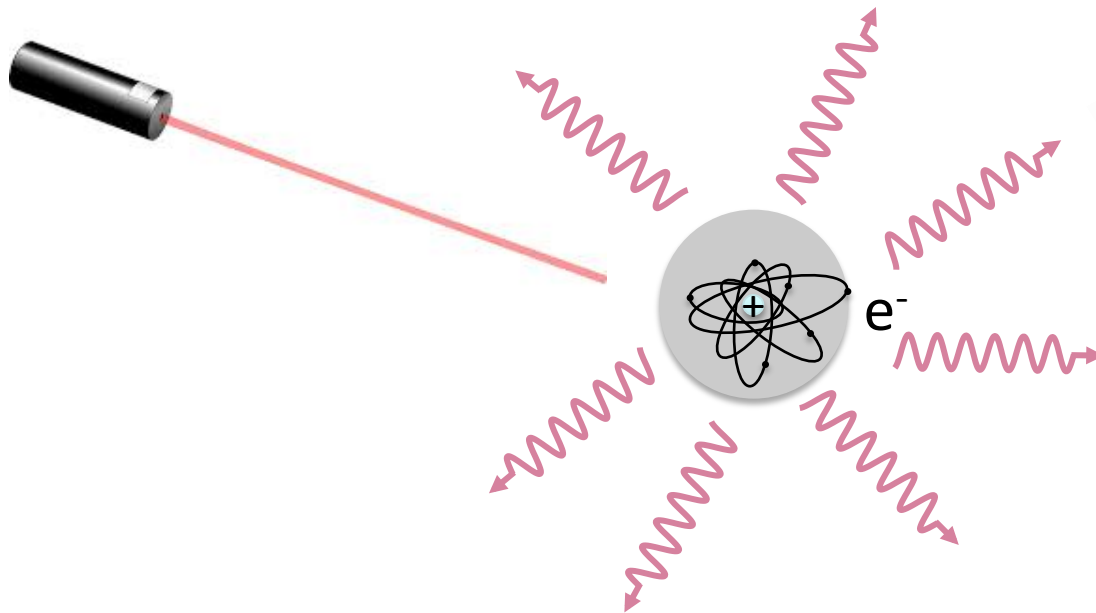
« Voir » un / des atome (s)

Microscope à effet tunnel (IBM, 1981)

« voit » la répartition des e^-

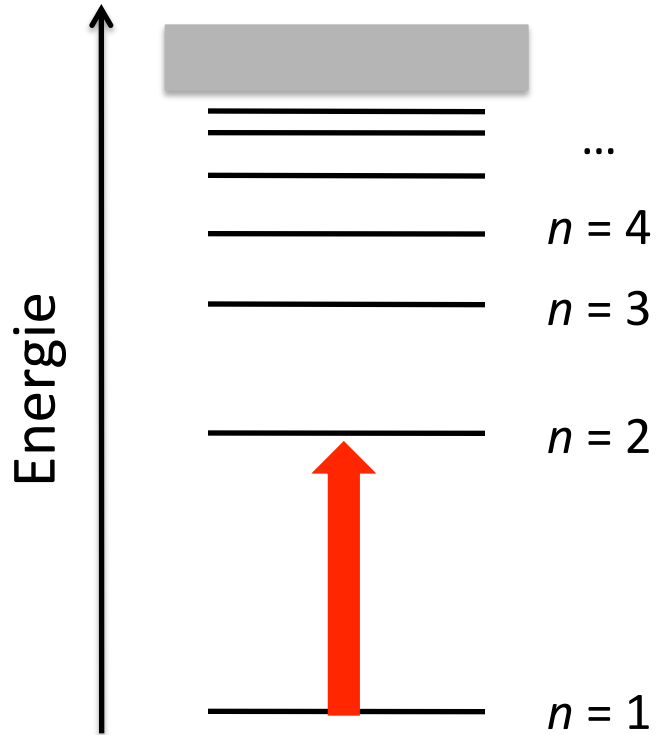


ICI envoyer de la lumière et regarder la diffusion par **un atome isolé...**



Attention : pas n'importe quelle couleur...

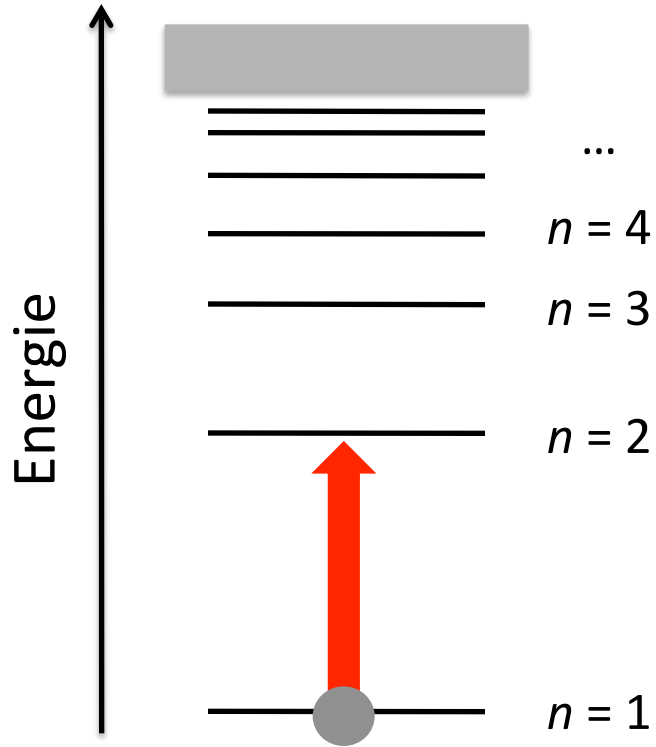
Diffusion de la lumière par un atome



Energie photon = énergie transition
 \Rightarrow **absorption**

**Fréquence du laser
sélectionne une transition**

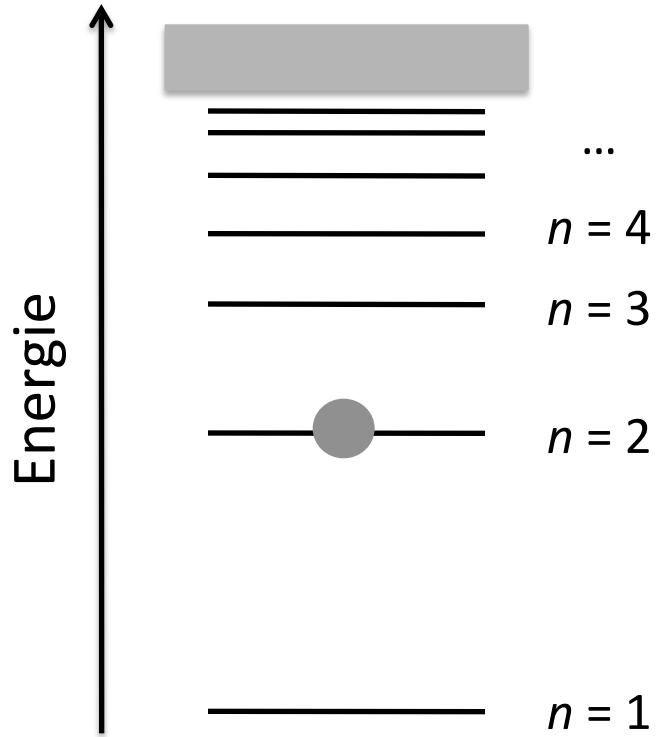
Diffusion de la lumière par un atome



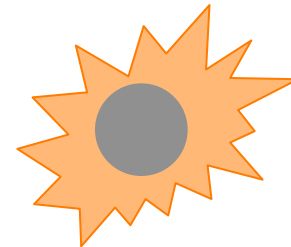
Energie photon = énergie transition
 \Rightarrow **absorption**



Diffusion de la lumière par un atome

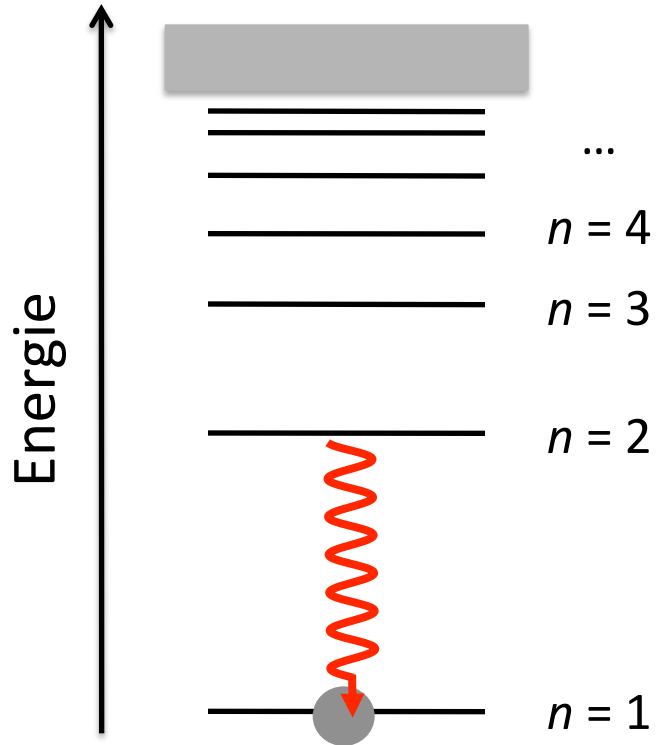


Energie photon = énergie transition
 \Rightarrow **absorption**



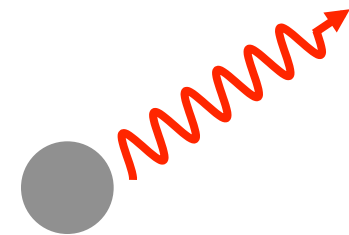
Atome excité

Diffusion de la lumière par un atome



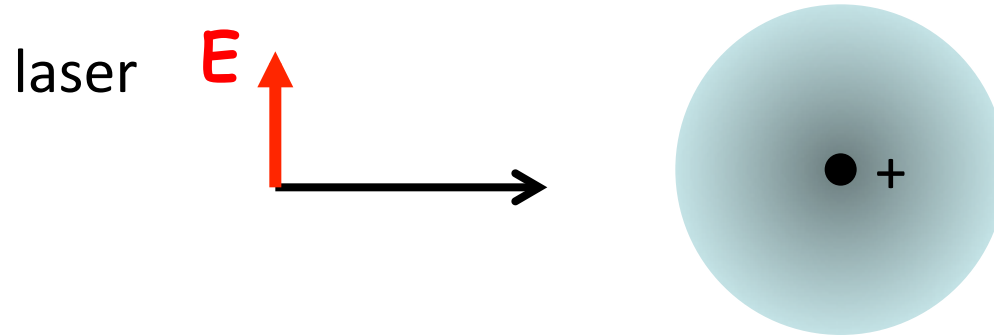
Energie photon = énergie transition
 \Rightarrow **absorption**

**Atome diffuse la lumière.
Fluorescence**



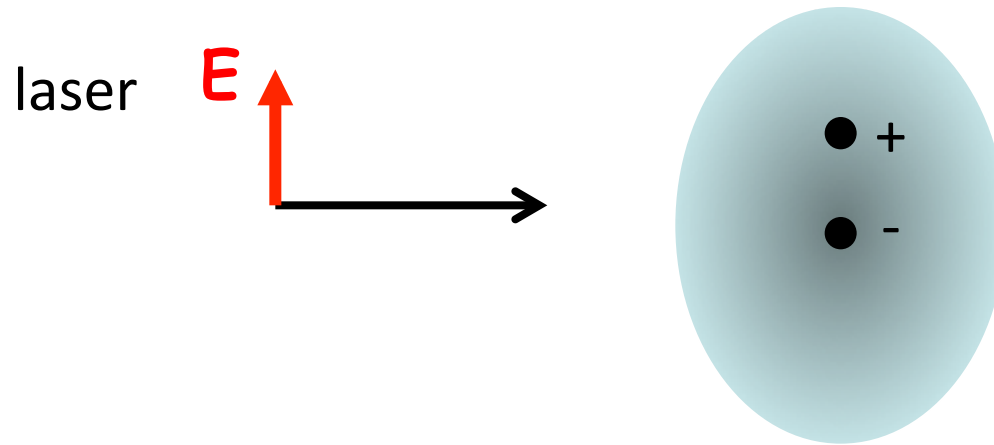
Piéger un atome neutre... avec des champs électriques...

Neutre $q = 0 \Rightarrow$ pas de force induite par E ou B ?



Piéger un atome neutre... avec des champs électriques...

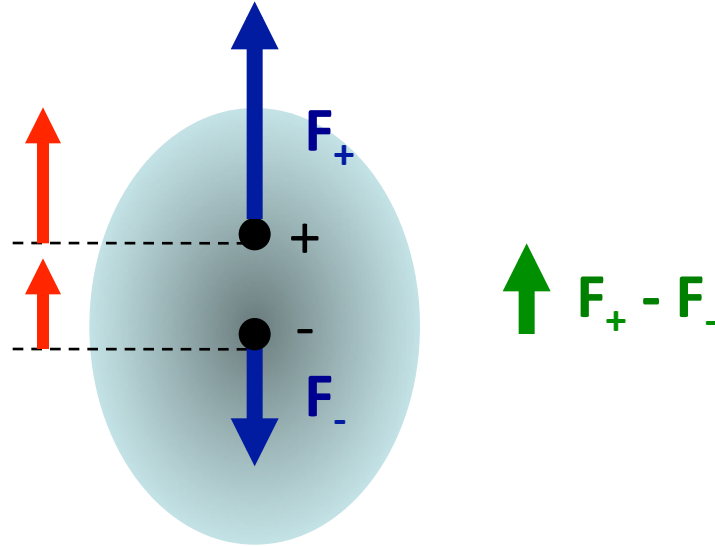
Neutre $q = 0 \Rightarrow$ pas de force induite par E ou B ?



Piéger un atome neutre... avec des champs électriques...

Neutre $q = 0 \Rightarrow$ pas de force induite par E ou B ?

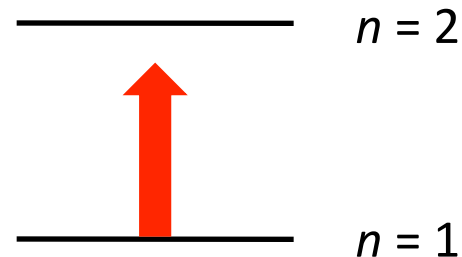
Champ inhomogène



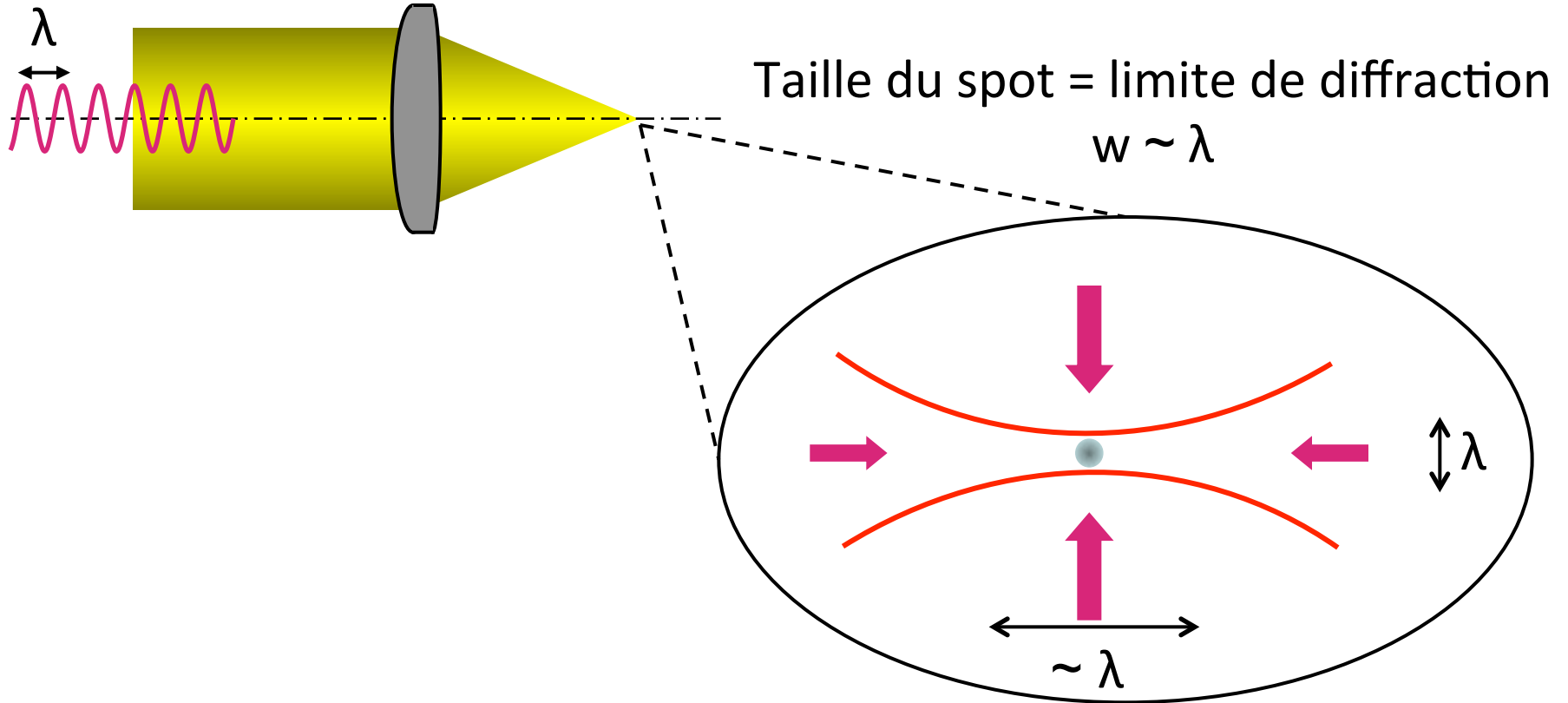
Force proportionnelle à intensité (Watt / cm^2)
laser ($\sim E^2$) ; dirigée vers **grande intensité**

Pourquoi pas de fluorescence?

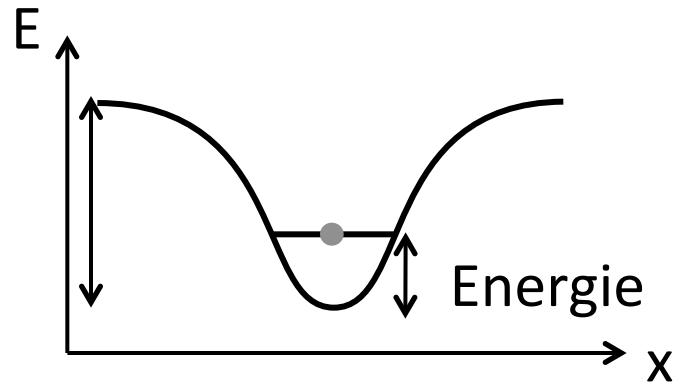
Laser non résonant...!



Piéger avec un faisceau laser : la pince optique



Profondeur < 1 mK
 \Rightarrow **atomes froids**

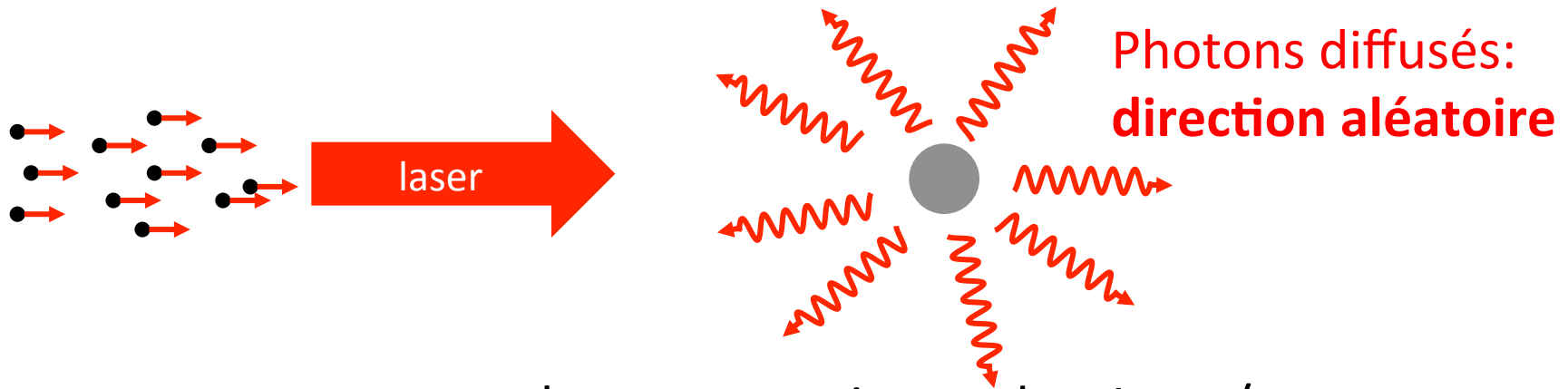


Refroidissement laser (1980 - 1990)

Température \Rightarrow mouvements agitation désordonnés

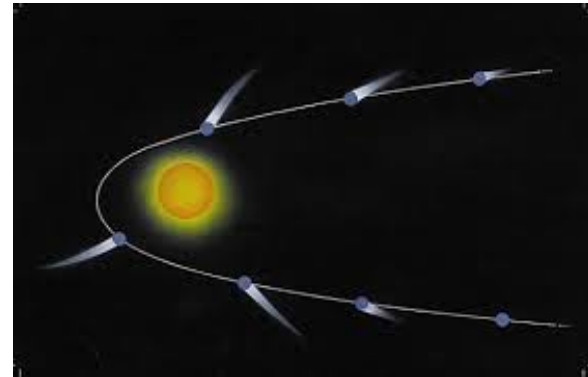
$$T = 300 \text{ K} \Rightarrow v \sim 500 \text{ m/s}$$

Diffusion de la lumière \Rightarrow pression de radiation



\Rightarrow en moyenne changement vitesse de -1 cm / sec

Efficace car répété $\sim 10^7$ fois / sec

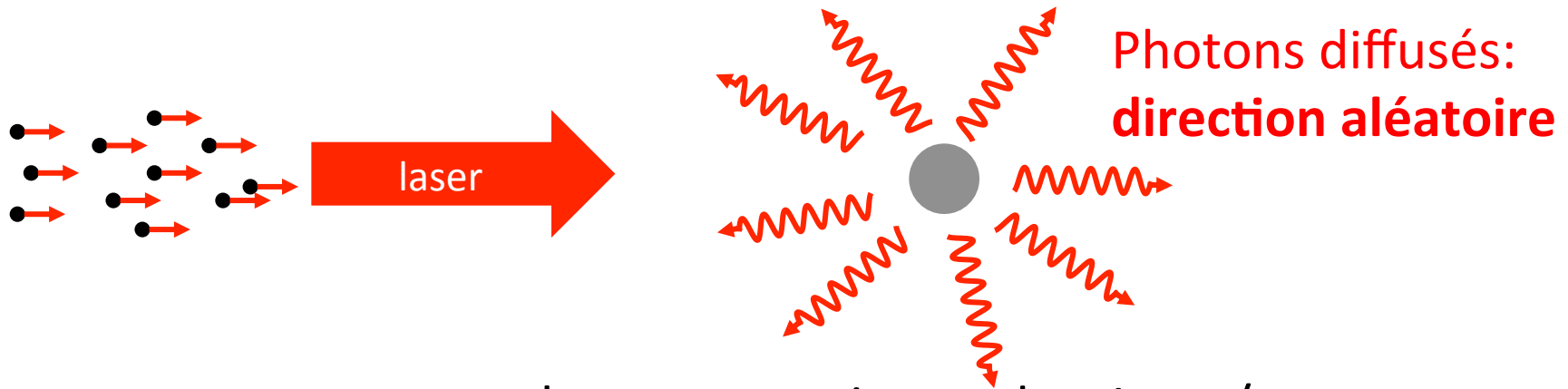


Refroidissement laser (1980 - 1990)

Température \Rightarrow mouvements agitation désordonnés

$$T = 300 \text{ K} \Rightarrow v \sim 500 \text{ m/s}$$

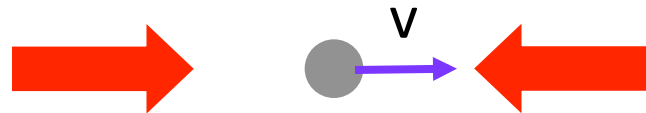
Diffusion de la lumière \Rightarrow pression de radiation



\Rightarrow en moyenne changement vitesse de -1 cm / sec

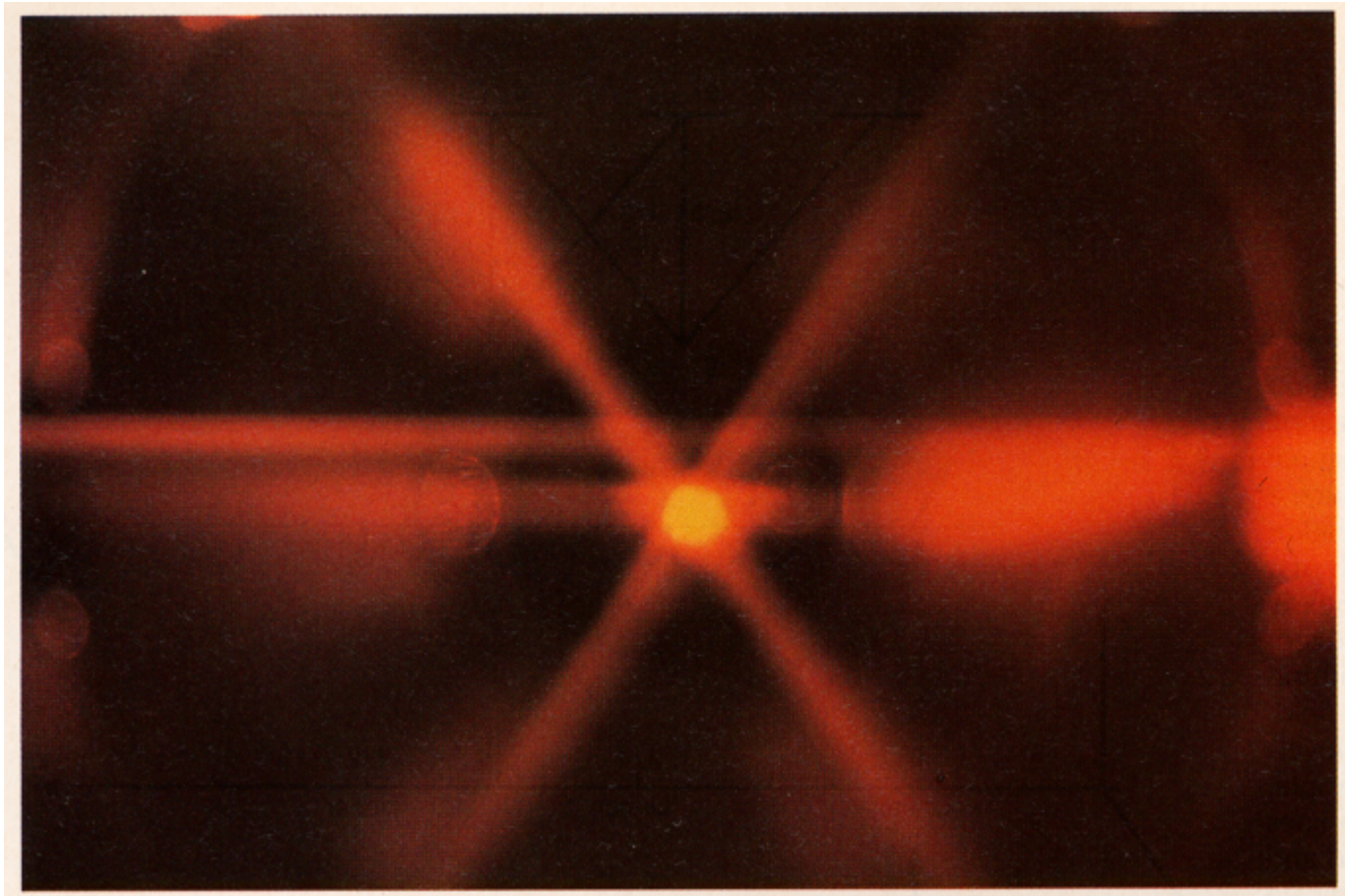
Efficace car répété $\sim 10^7$ fois / sec

Refroidissement dans une « **mélasse optique** »



Force de friction $\mathbf{F} \propto -\mathbf{v} \Rightarrow T = 10 - 100 \mu\text{K} \Rightarrow \mathbf{v} \sim 1 \text{ cm/s}$

Image de mélasse optique d'atomes de sodium (Chu, 1985)



1997



S. Chu

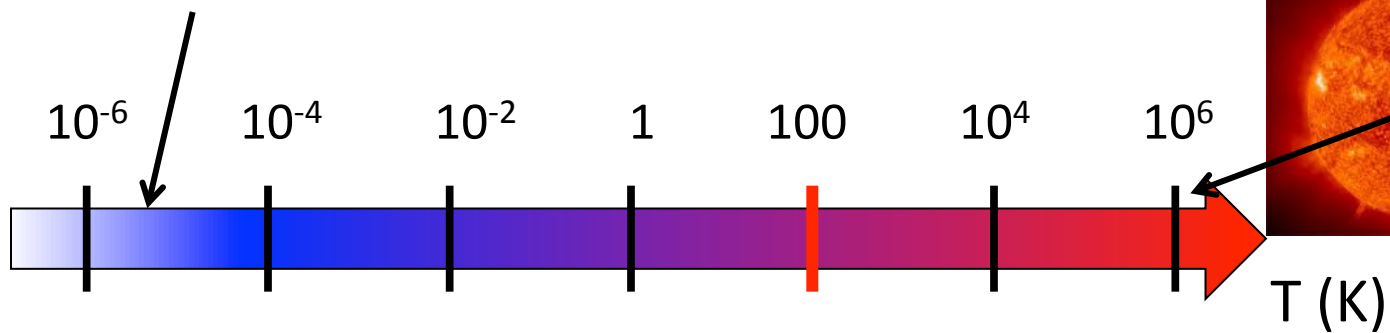
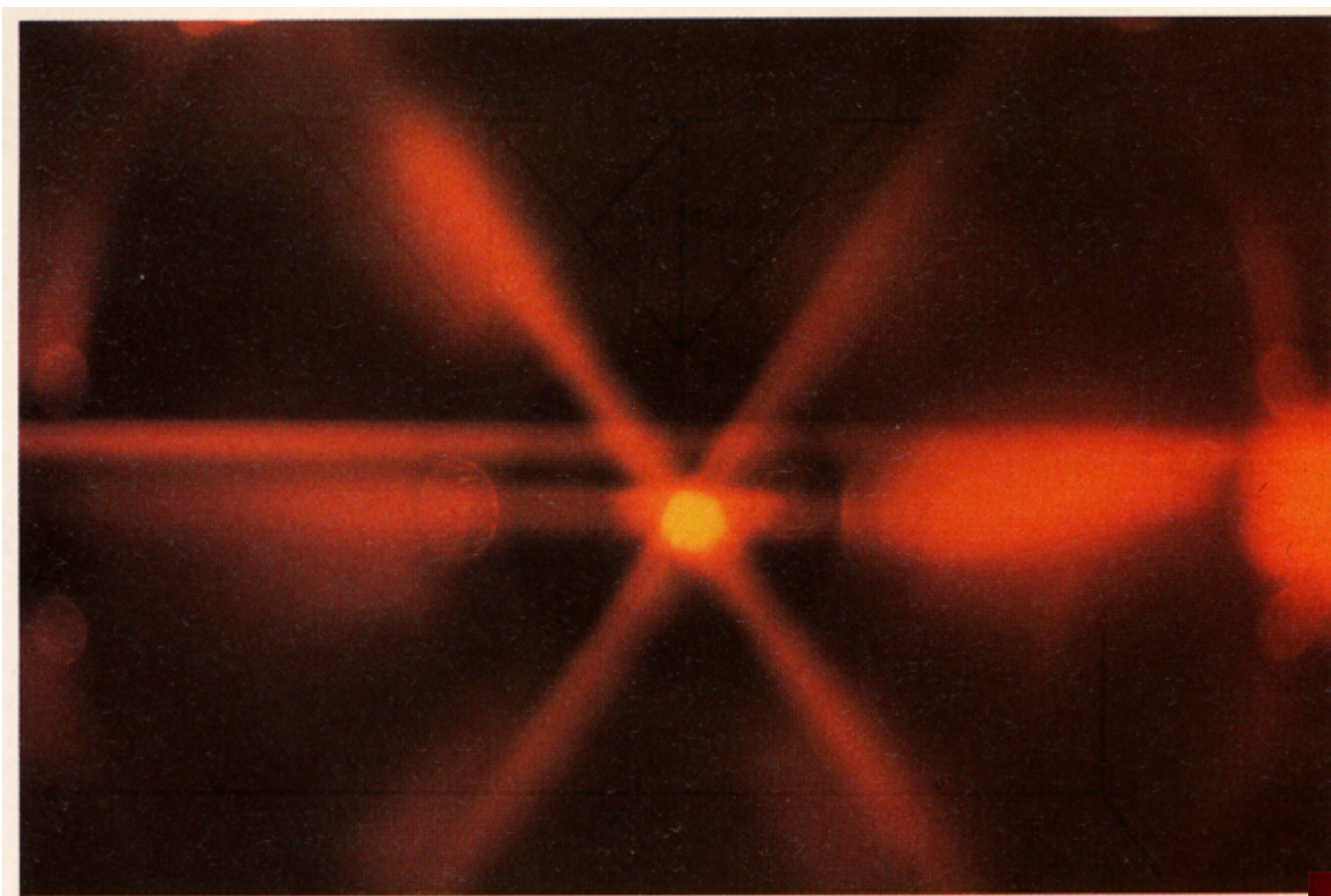


W. D. Phillips

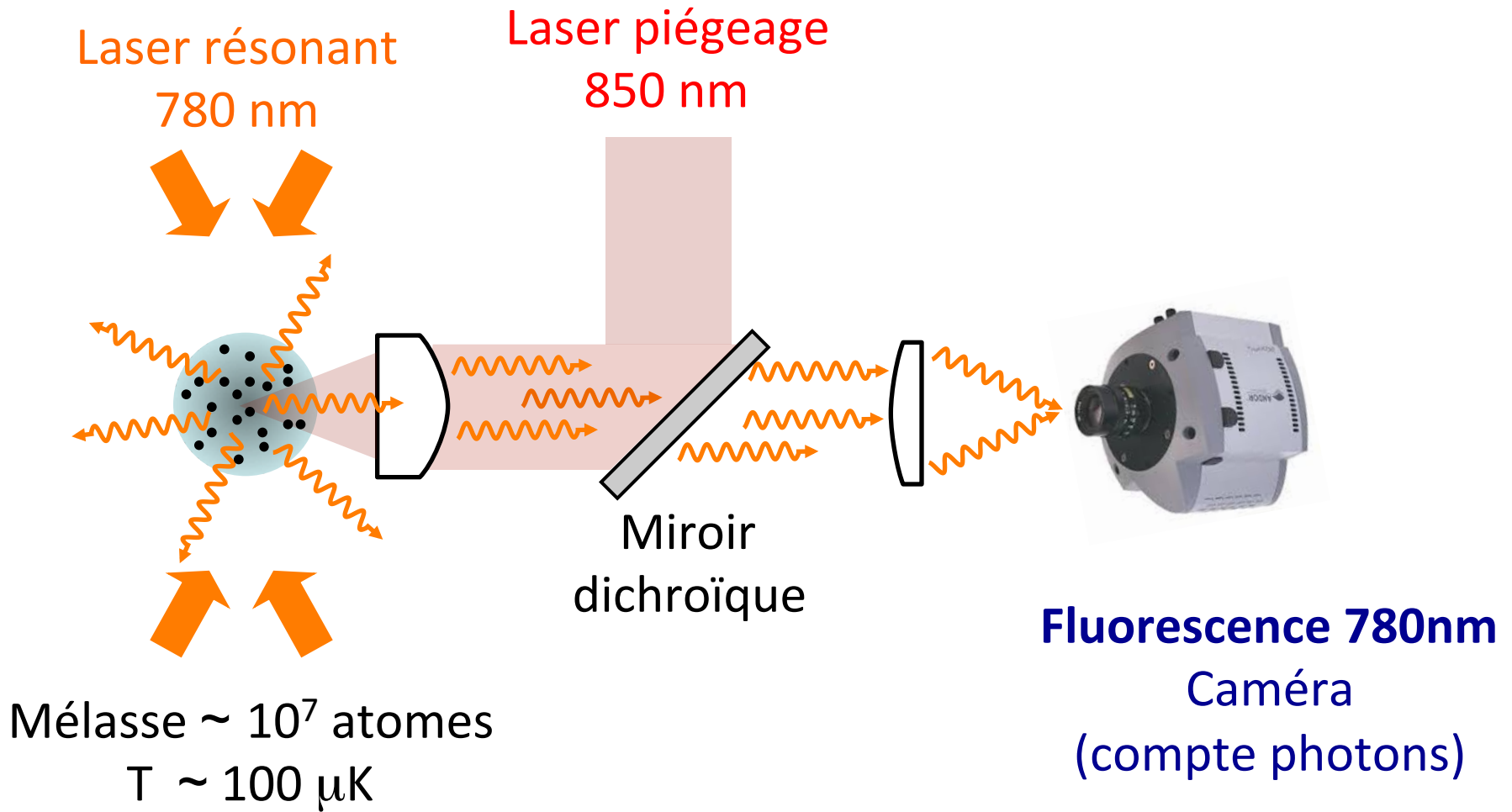


C. Cohen-Tannoudji

Image de mélasse optique d'atomes de sodium (Chu, 1985)

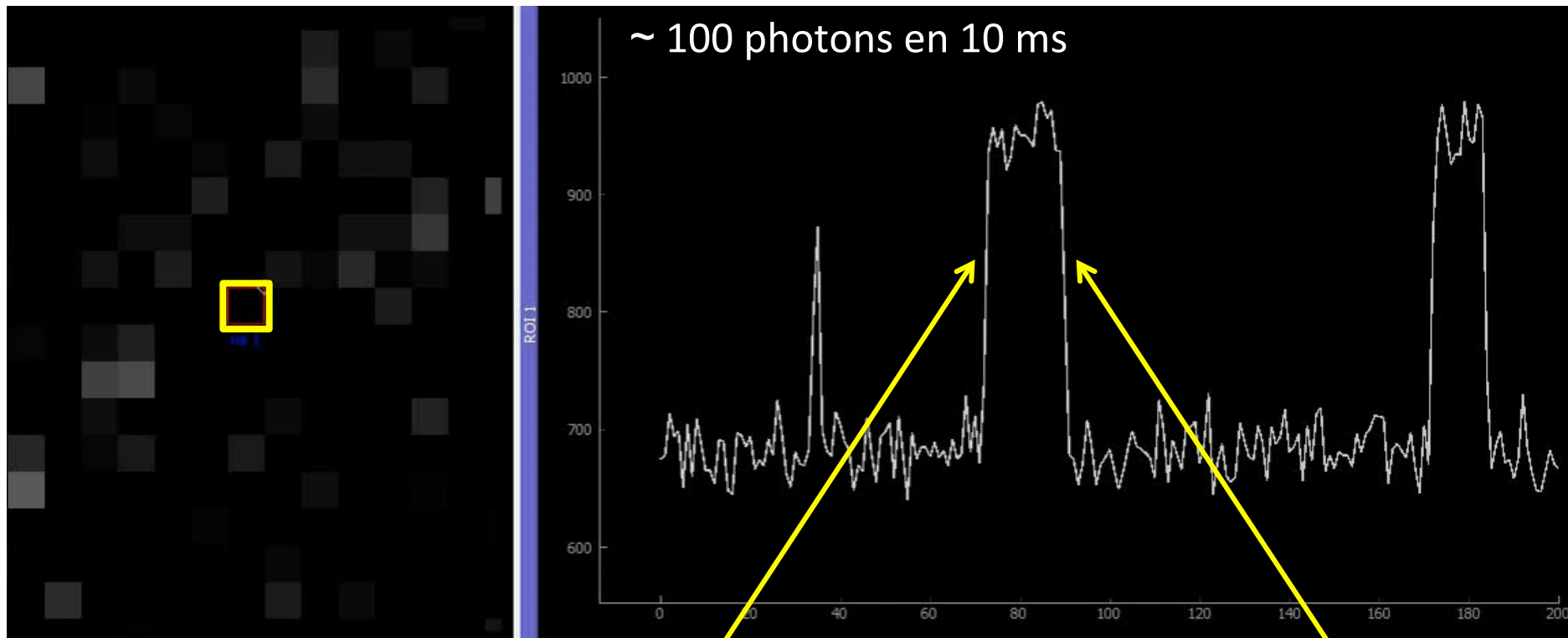


La pince optique: piéger ET voir un atome



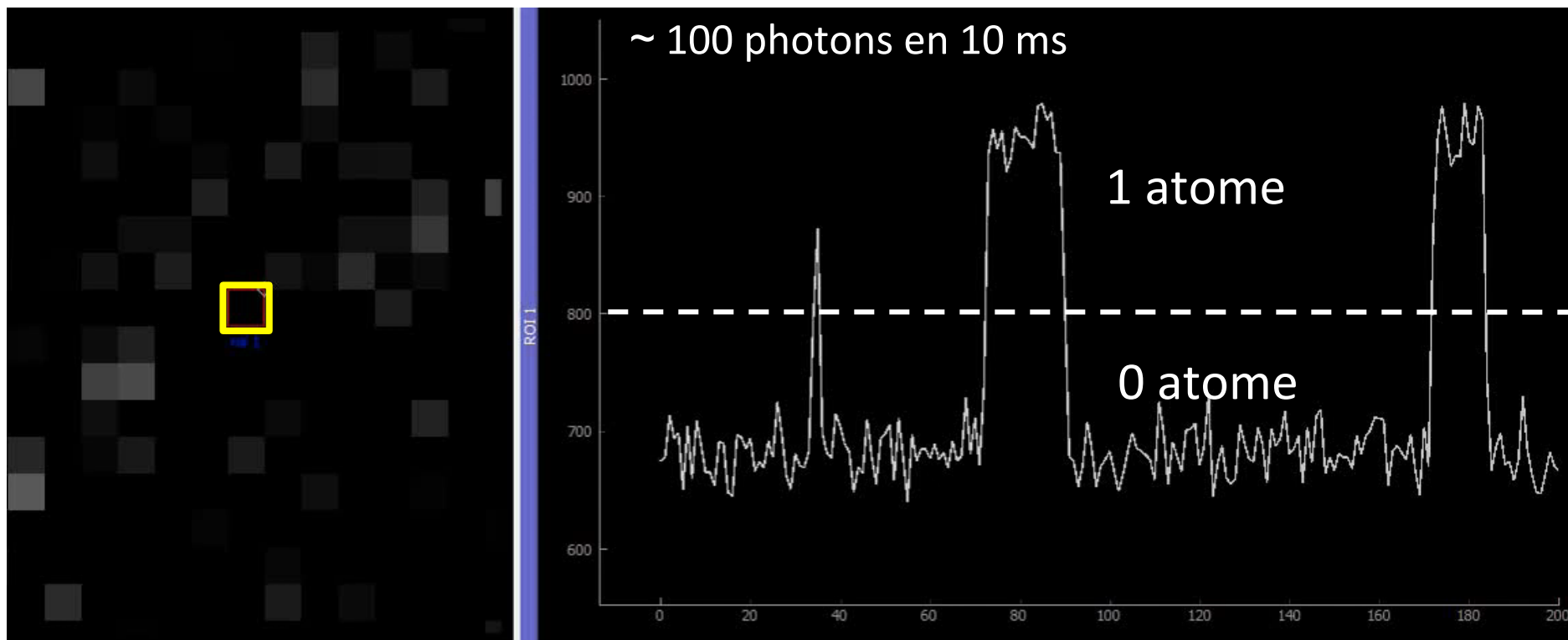
Le piège est « trop petit » pour piéger deux atomes à la fois...

Fluorescence @ 780 nm induite par laser de refroidissement



Le piège est « trop petit » pour piéger deux atomes à la fois...

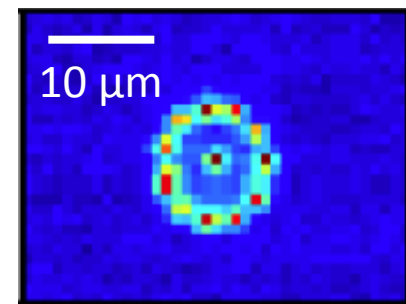
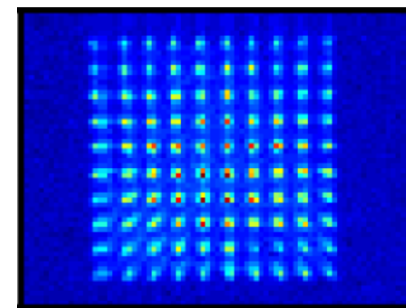
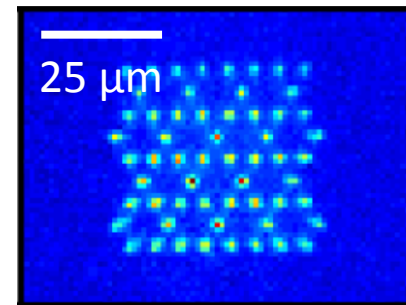
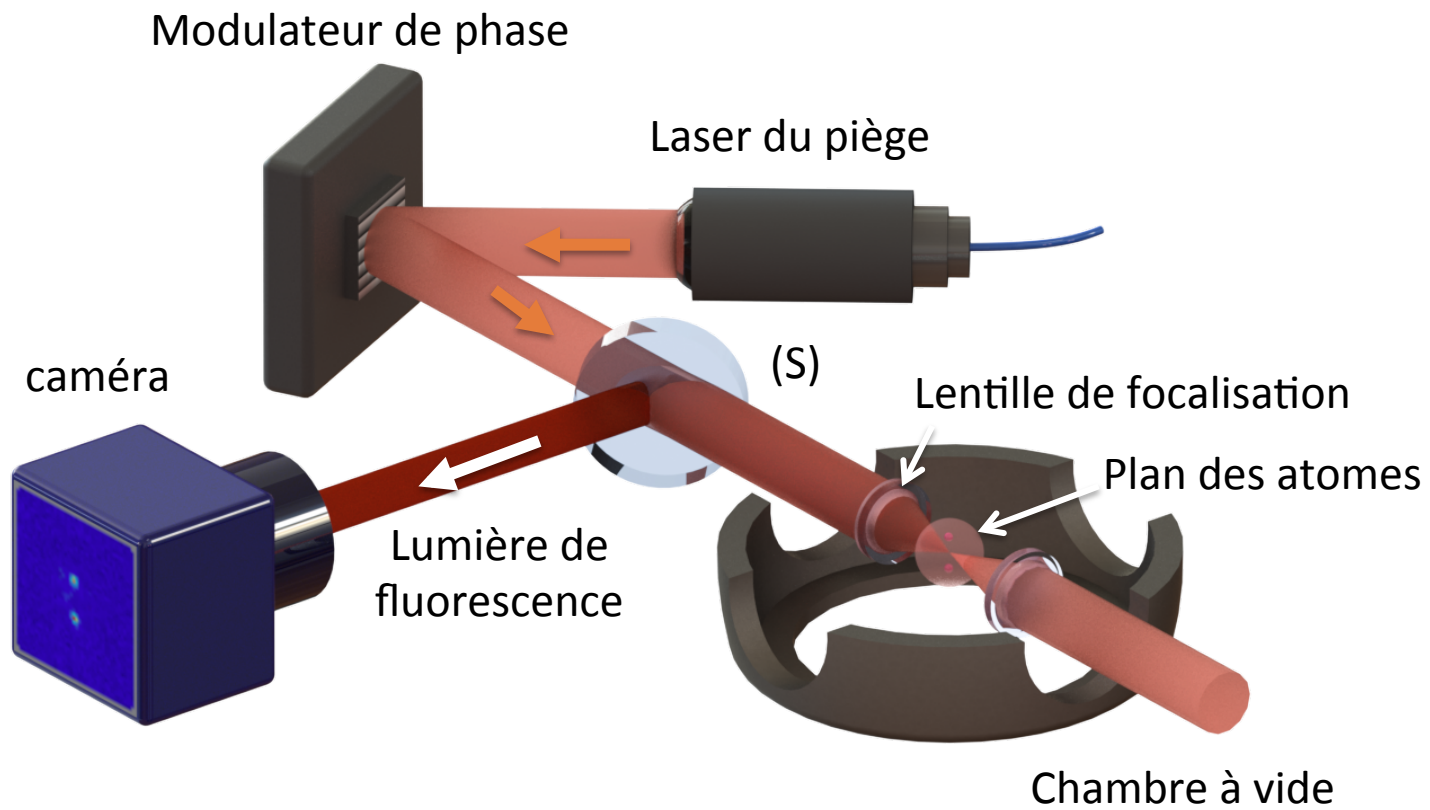
Fluorescence @ 780 nm induite par laser de refroidissement



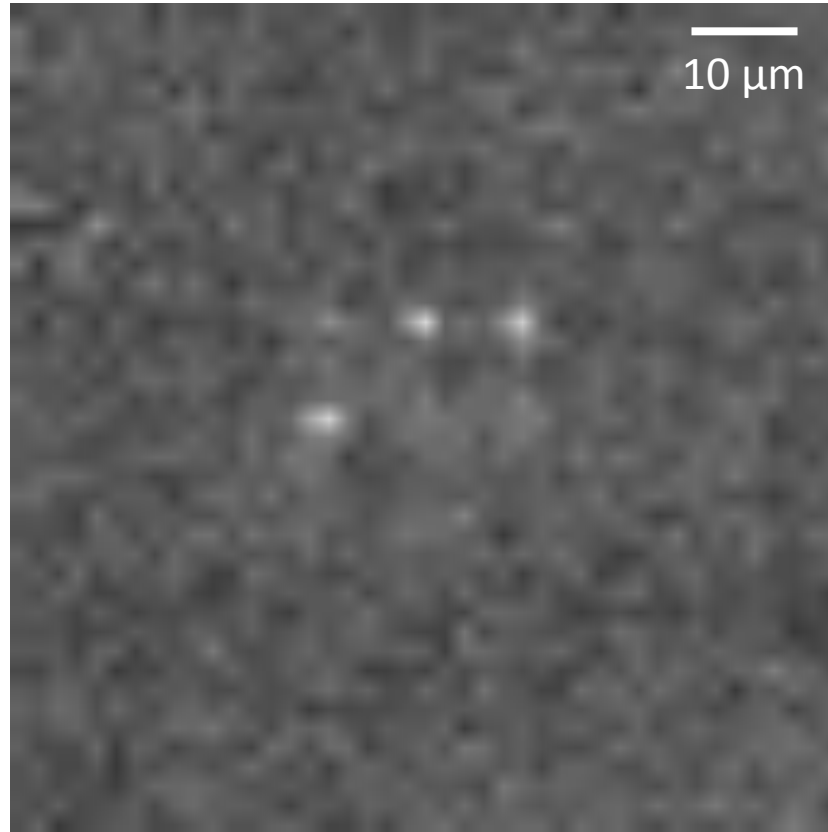
Multiplier les pièges avec un seul faisceau : diffraction

Lampadaire à travers un voileage...



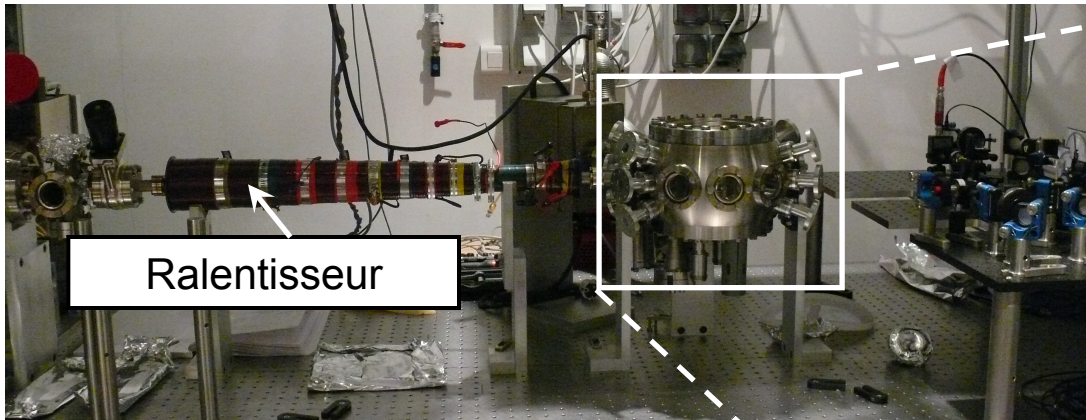


Matrice de pinces optiques avec des atomes individuels

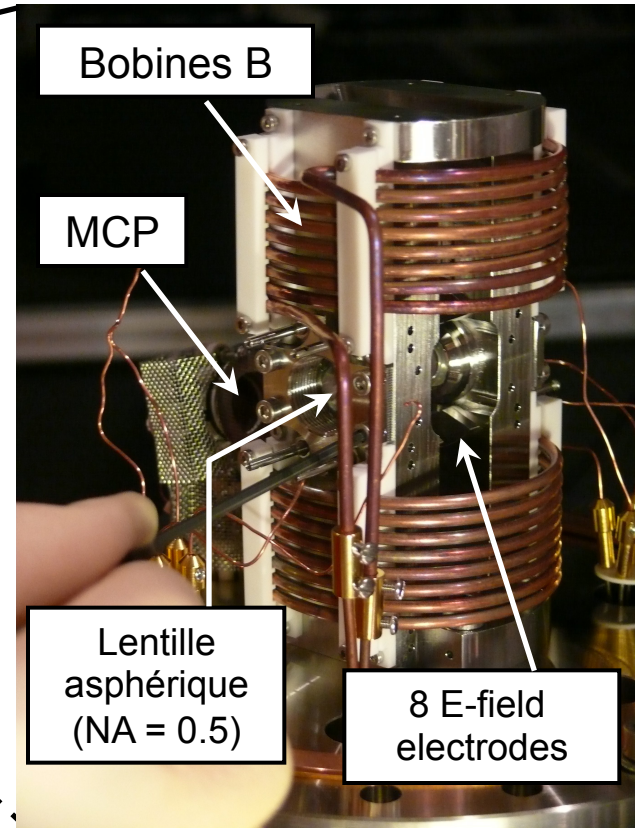


En pratique...

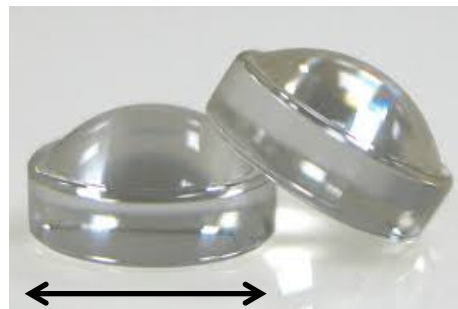
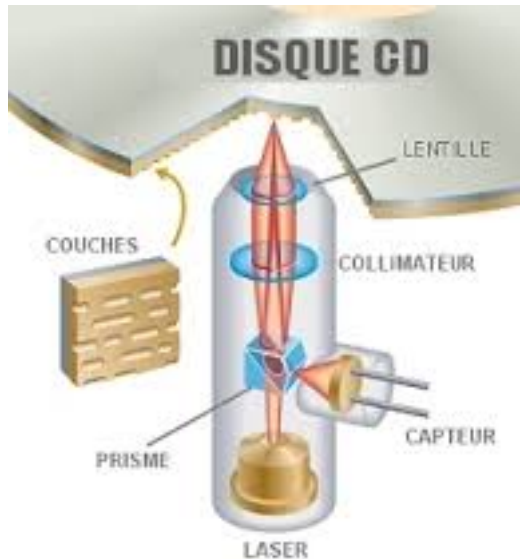
2 ans de travail pour 3 personnes + 300 000 €



~ 1 m



~ 7 cm

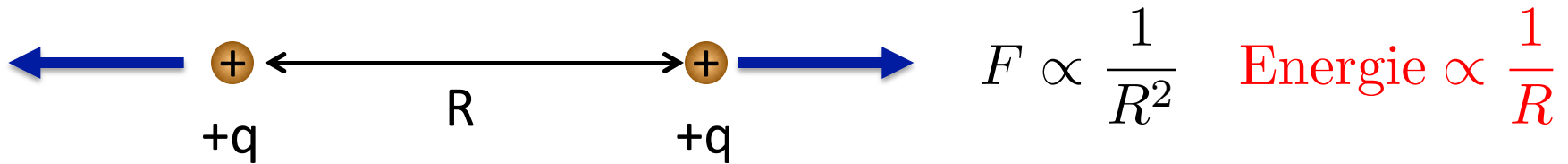


~ 1 cm

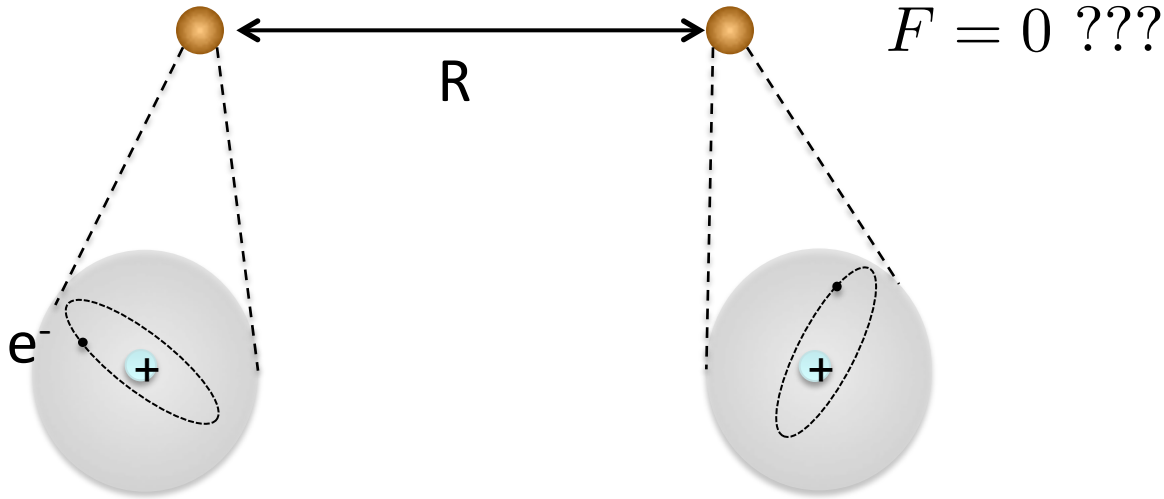
Contrôler l'interaction entre
quelques atomes

L'interaction de van der Waals entre deux atomes

Charges électriques

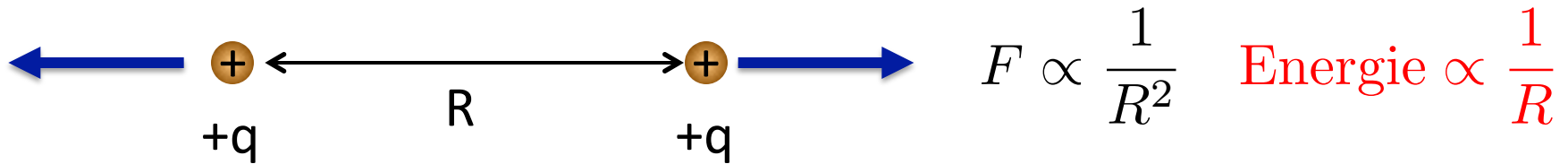


Atomes

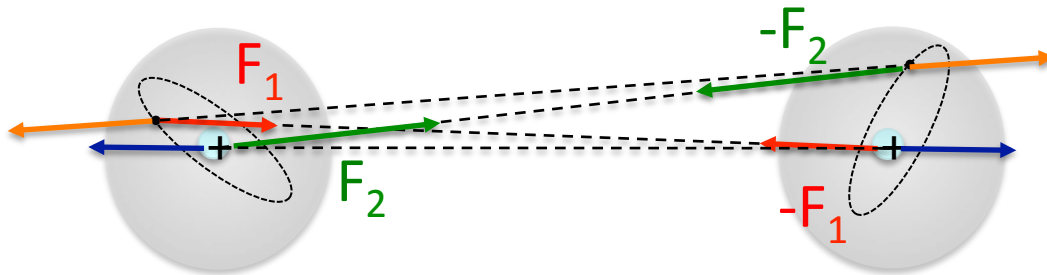
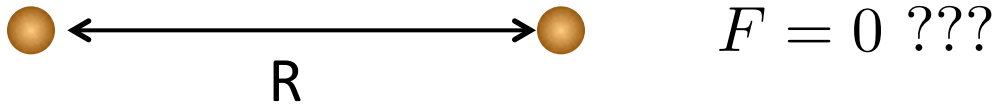


L'interaction de van der Waals entre deux atomes

Charges électriques

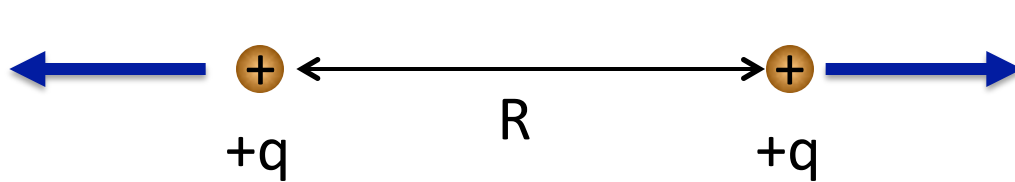


Atomes



L'interaction de van der Waals entre deux atomes

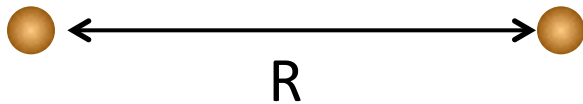
Charges électriques



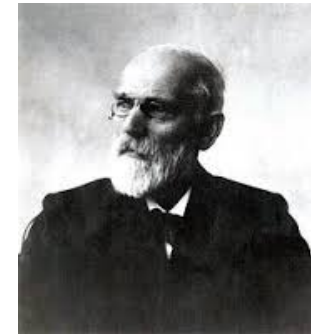
$$F \propto \frac{1}{R^2}$$

$$\text{Energie} \propto \frac{1}{R}$$

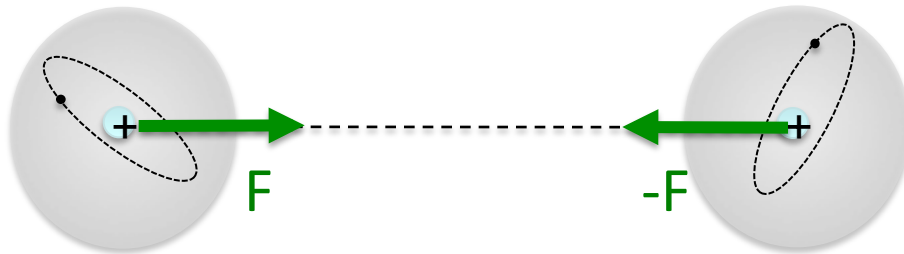
Atomes



$$F = 0 \text{ ???}$$



J. D. van der Waals
(1837 - 1923)



$$F = \propto \frac{1}{R^7}$$

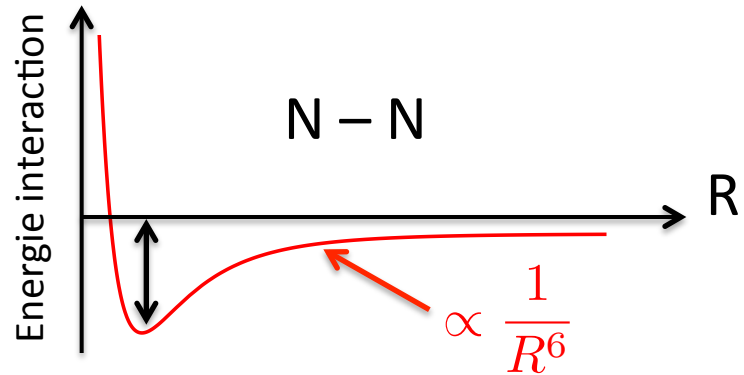
$$\text{Energie} \propto \frac{1}{R^6}$$

Note: Force gravité = Force van der Waals / 10^{17} !!

La force de van der Waals autour de nous

Toutes les molécules existent grâce à l'attraction de van der Waals...

Ex: N_2 , H_2 , O_2



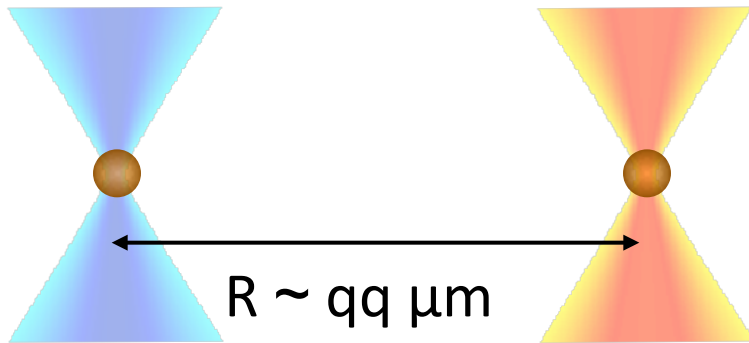
Mesure macroscopique de vdW:

Ex: mesure énergie à fournir pour dissocier 1L de O_2

Le gecko au plafond...

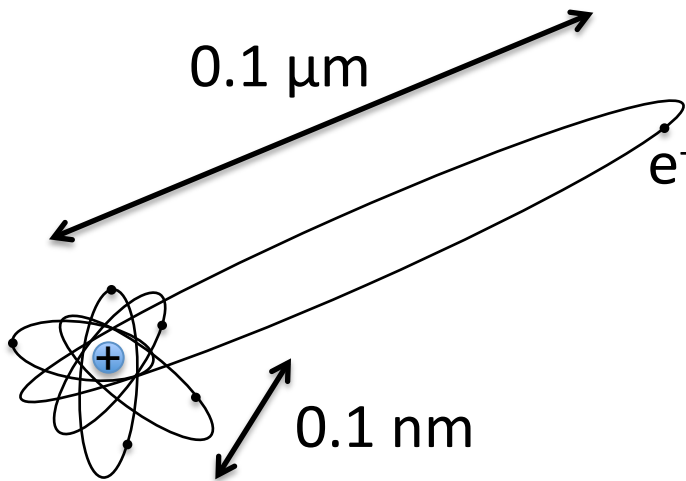


Mais pas de mesure entre juste deux atomes...

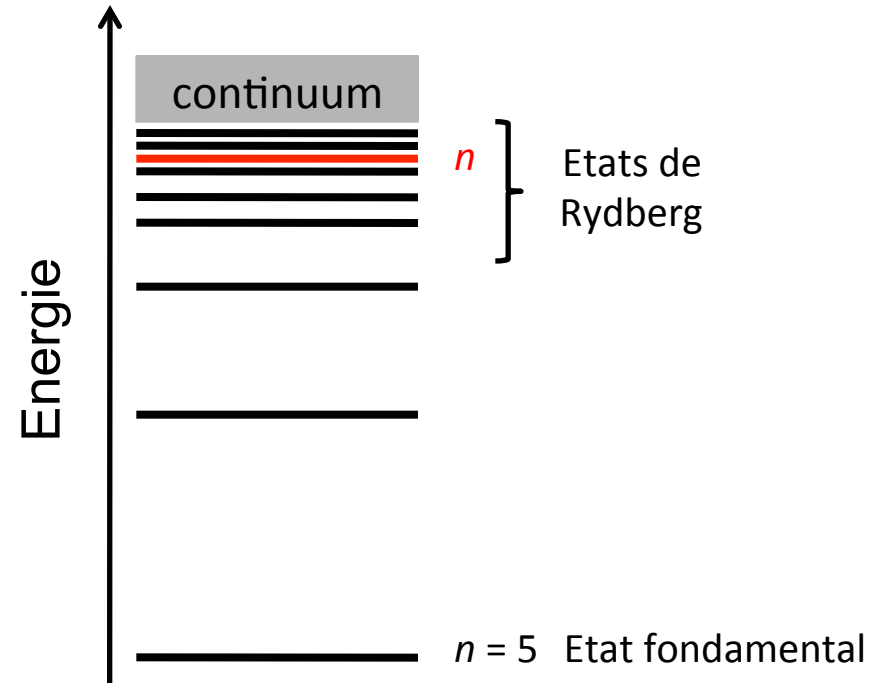


Problème : interaction vdW
 très, très, très... faible
 pour $R \sim qq \mu\text{m}$

Astuce: augmenter la séparation entre noyau et électron...



Conséquence : $U_{\text{vdW}} \propto \frac{n^{11}}{R^6}$!!!

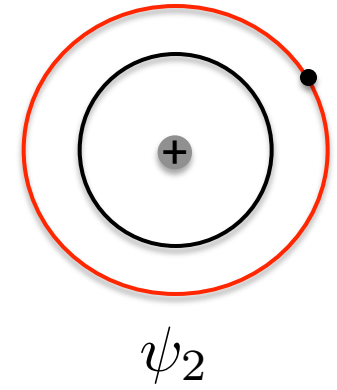
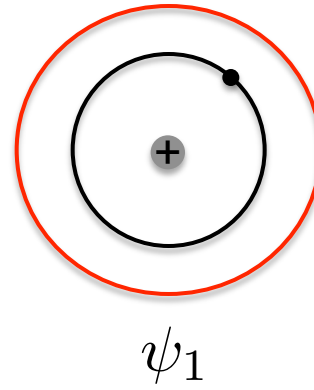
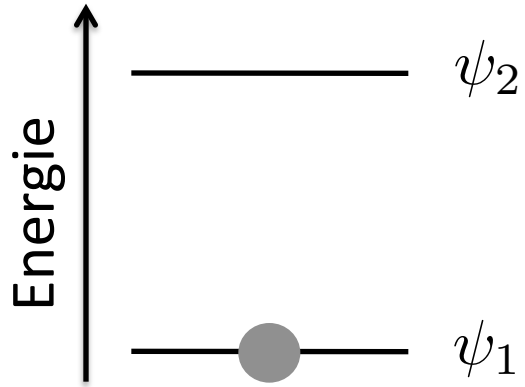


Ex: pour Rb: $n = 5$ vers $n = 50 \Rightarrow \text{vdW} \times 10^{11}$

Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



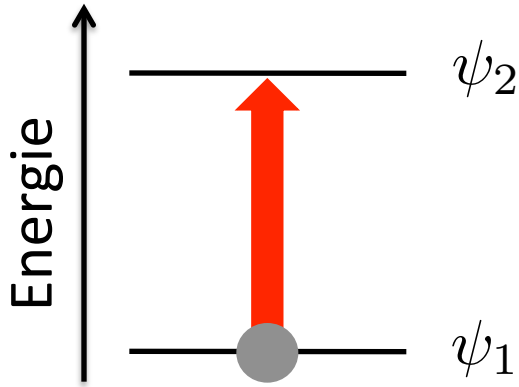
1944



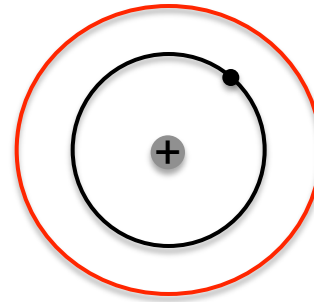
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



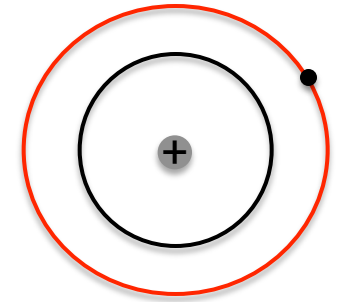
1944



Fluorescence



ψ_1



ψ_2



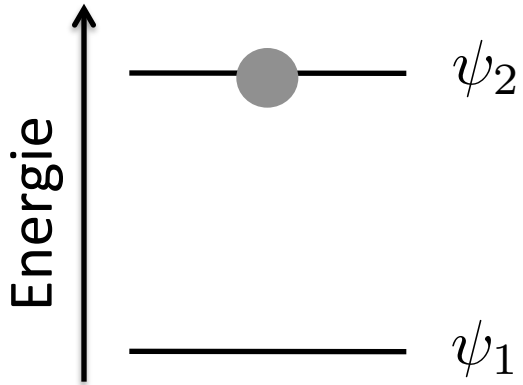
Atome

ψ_1

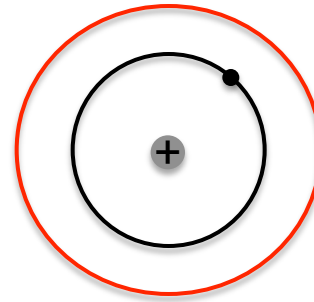
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



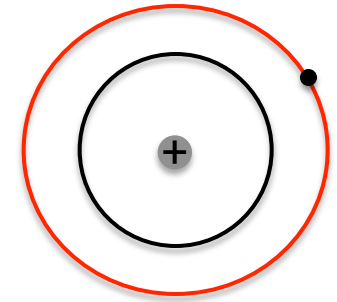
1944



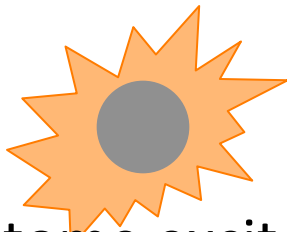
Fluorescence



ψ_1



ψ_2



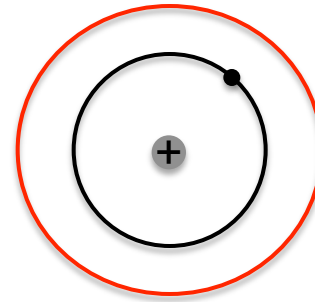
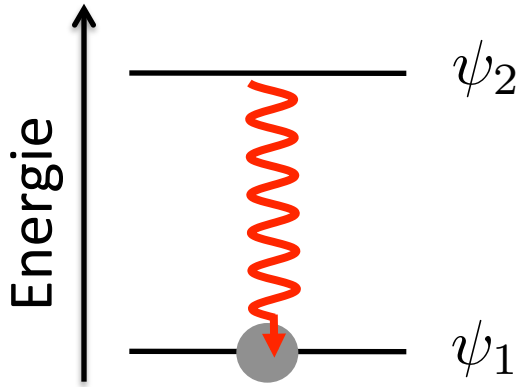
Atome excité

ψ_2

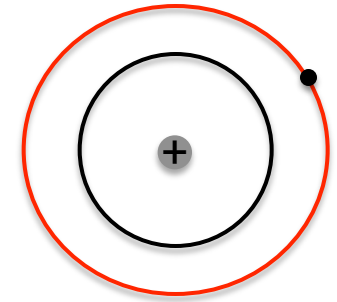
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



1944

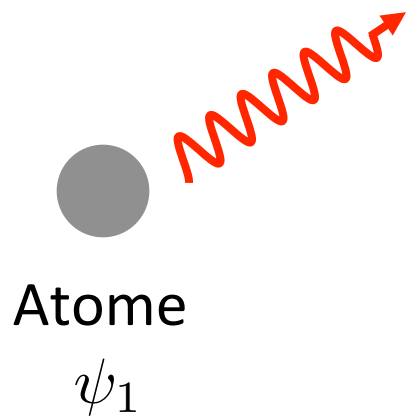


ψ_1



ψ_2

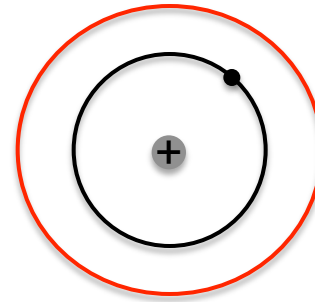
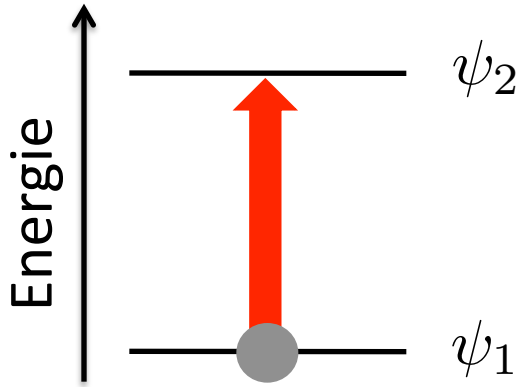
Fluorescence



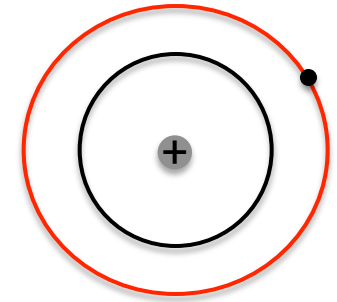
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



1944



ψ_1



ψ_2

Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser



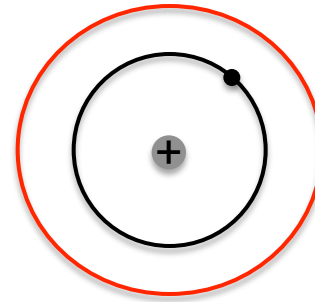
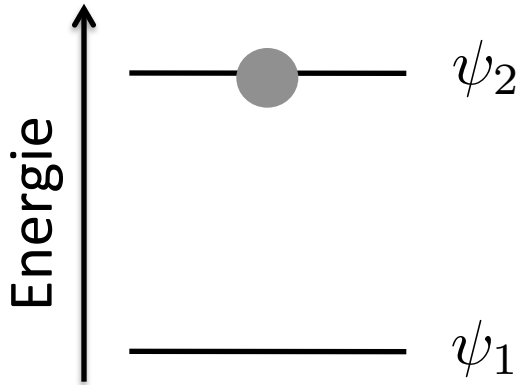
Atome

ψ_1

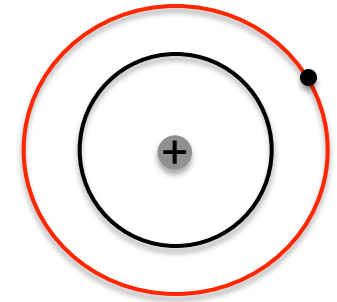
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



1944

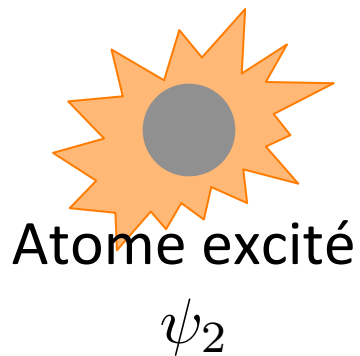


ψ_1



ψ_2

**Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser**



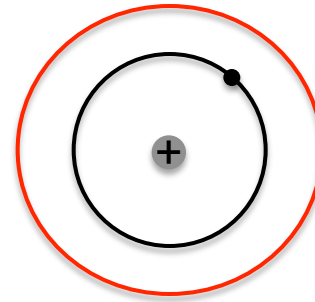
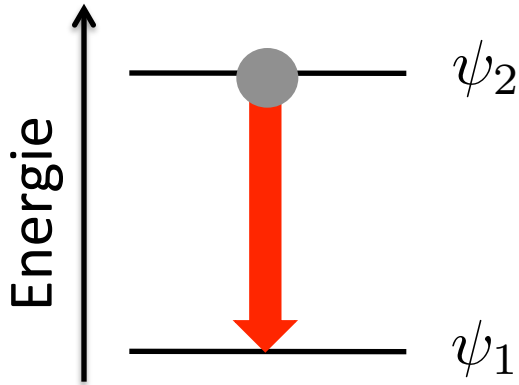
Atome excité

ψ_2

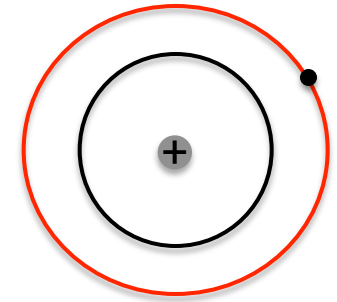
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



1944

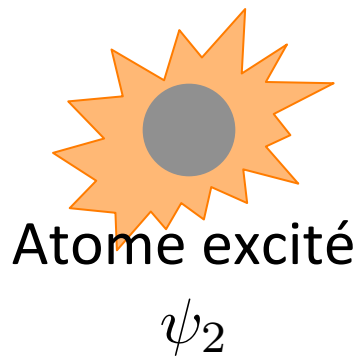


ψ_1



ψ_2

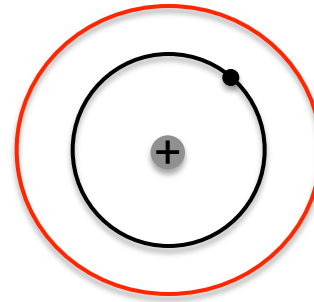
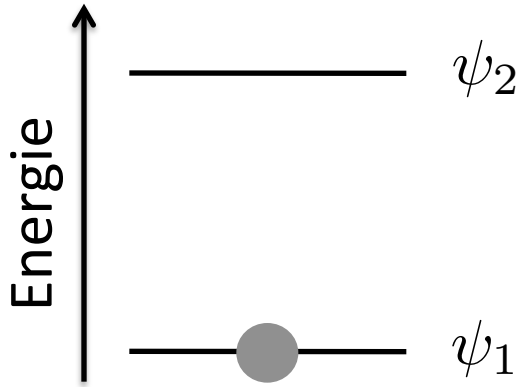
**Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser**



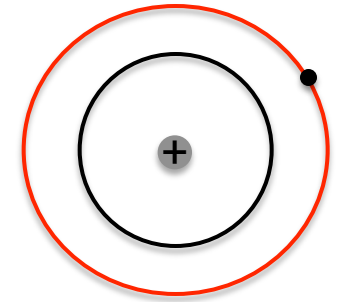
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



1944



ψ_1



ψ_2

Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser



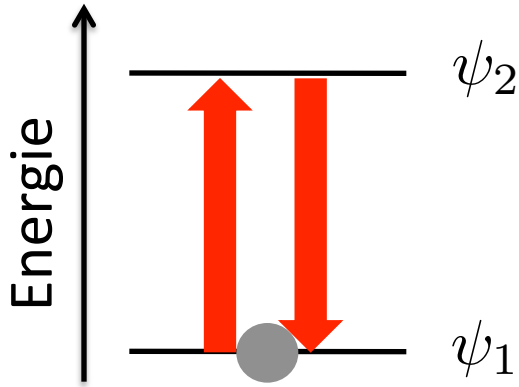
Atome

ψ_1

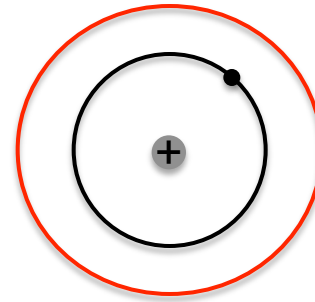
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



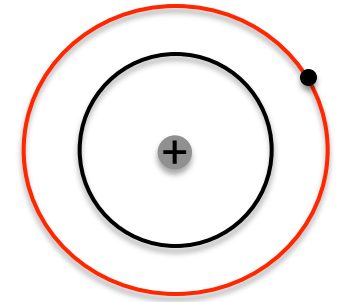
1944



Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser



ψ_1



ψ_2

Emission stimulée domine
quand laser intense



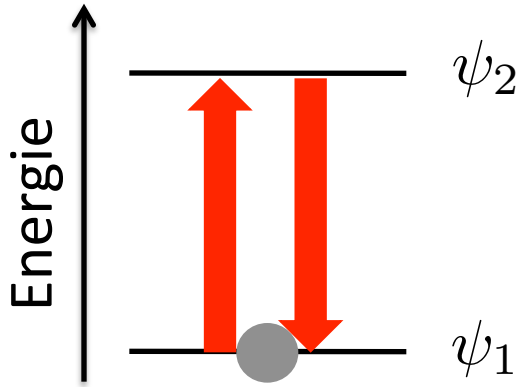
Atome

ψ_1

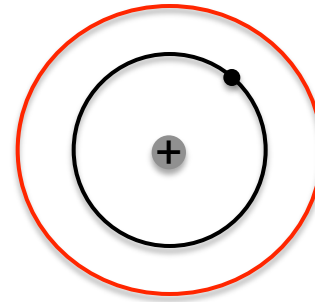
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



1944

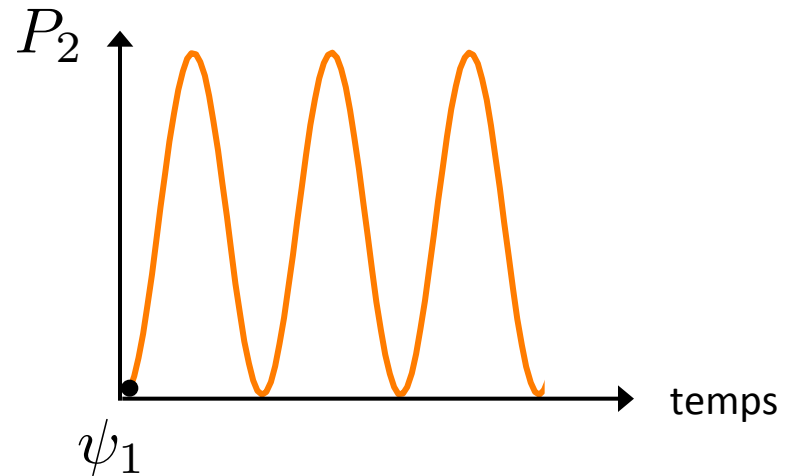


Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser



ψ_1

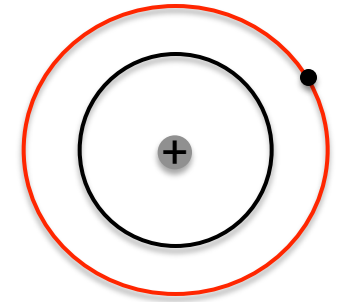
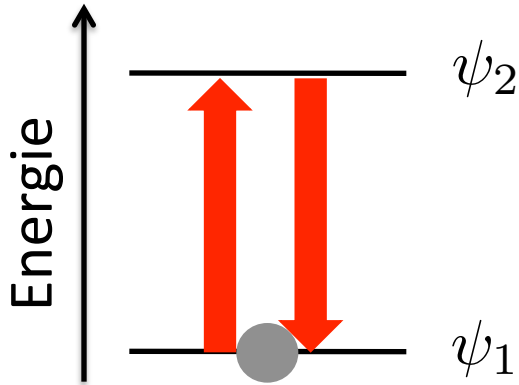
Emission stimulée domine
quand laser intense



Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



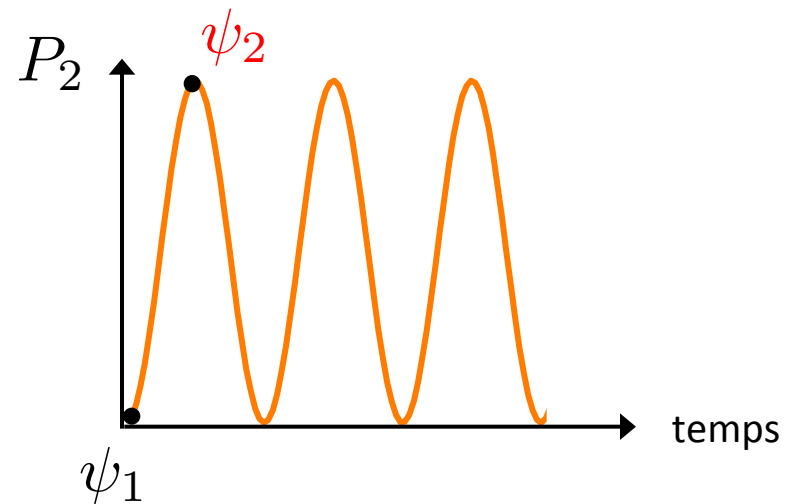
1944



ψ_2

Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser

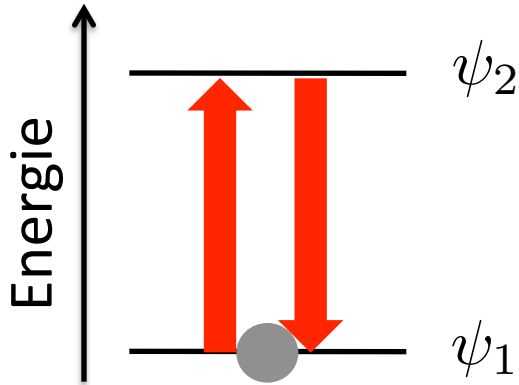
Emission stimulée domine
quand laser intense



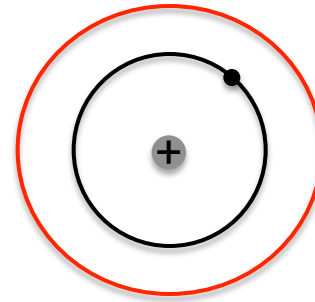
Les oscillations de Isidore Rabi (1930)



1944

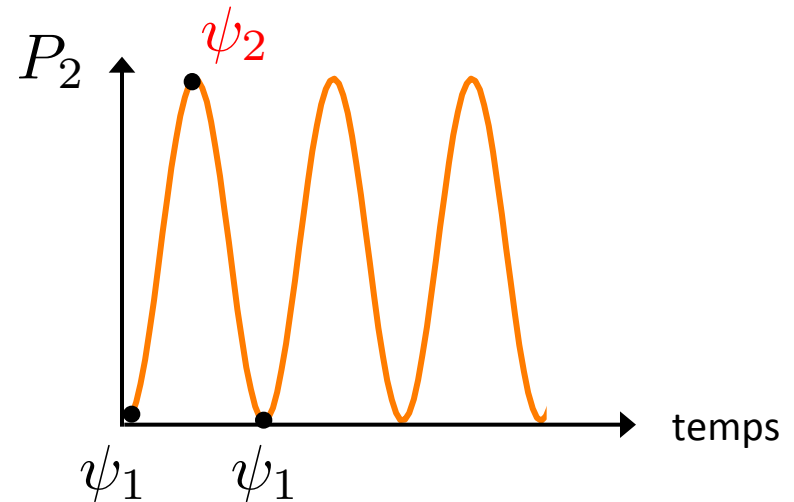


Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser



ψ_1

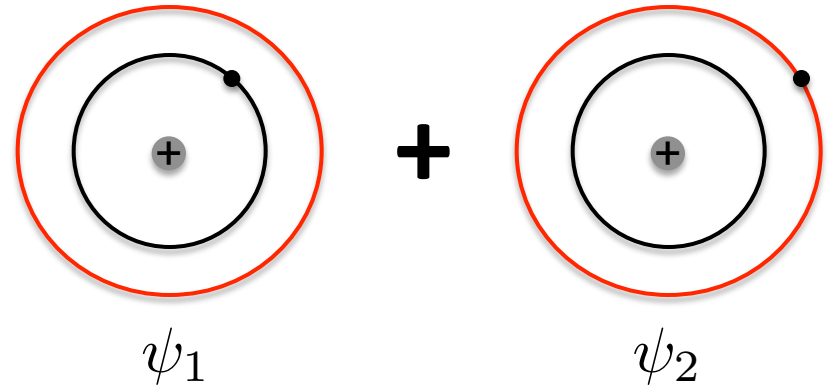
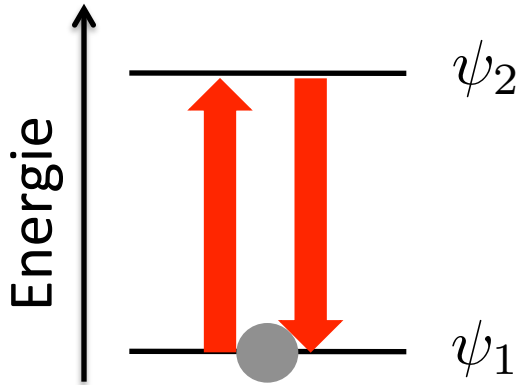
Emission stimulée domine
quand laser intense



Les oscillations de Isidore Rabi (1930)

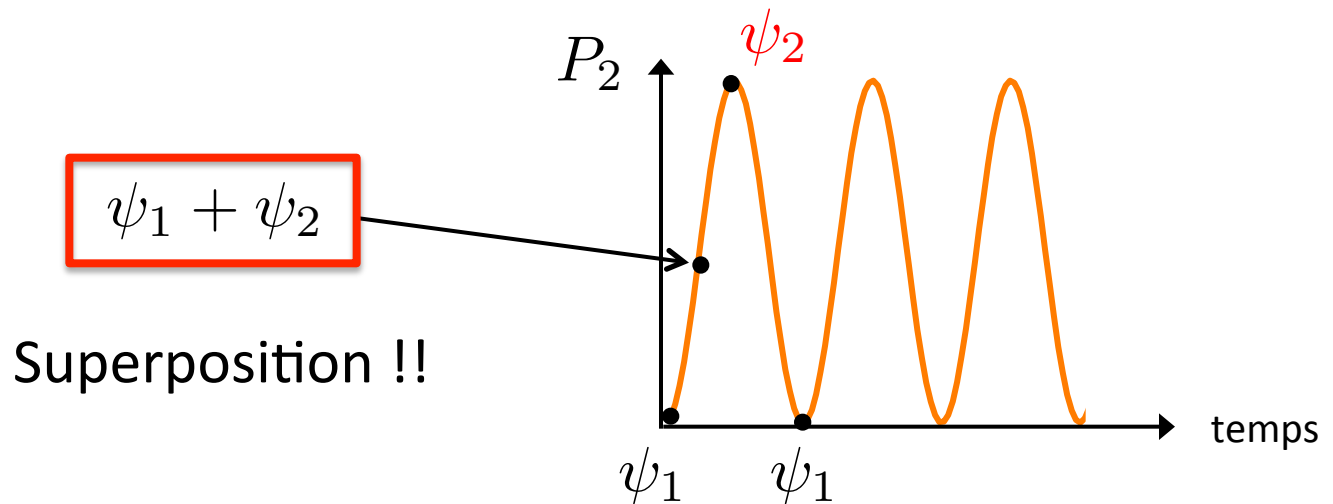


1944

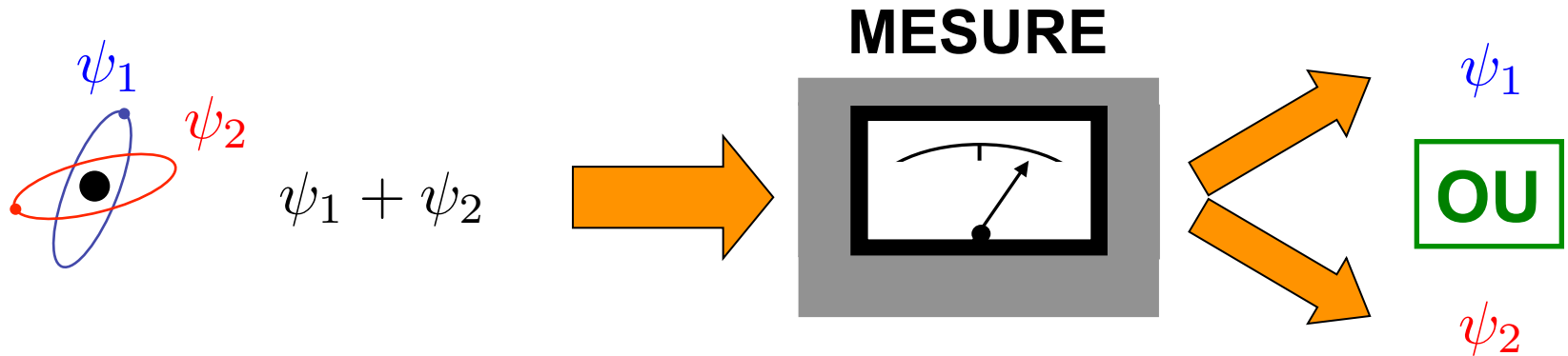


Emission stimulée :
l'atome rend l'énergie
au laser

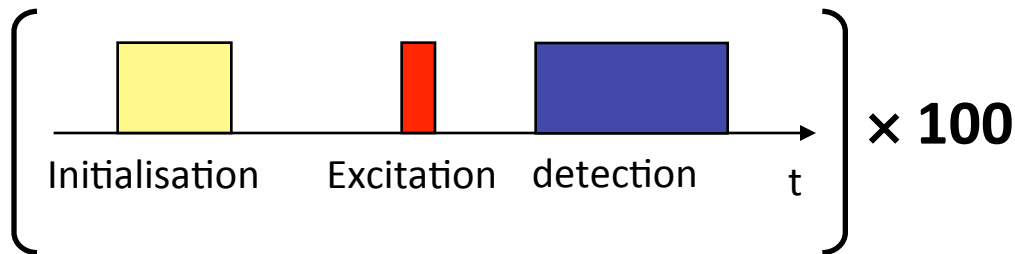
Emission stimulée domine
quand laser intense



Mesure sur un seul atome: toujours le "ridicule"...

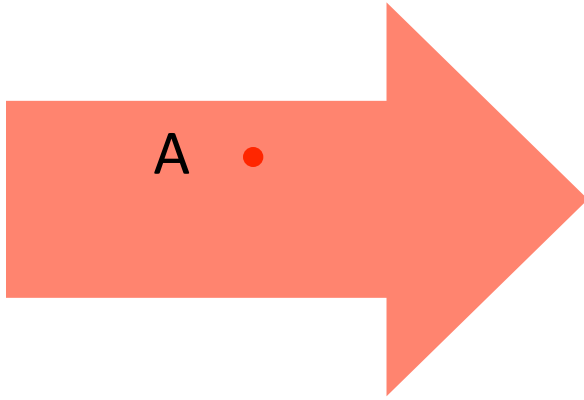


Conséquence pour l'expérimentateur: répéter la mesure...



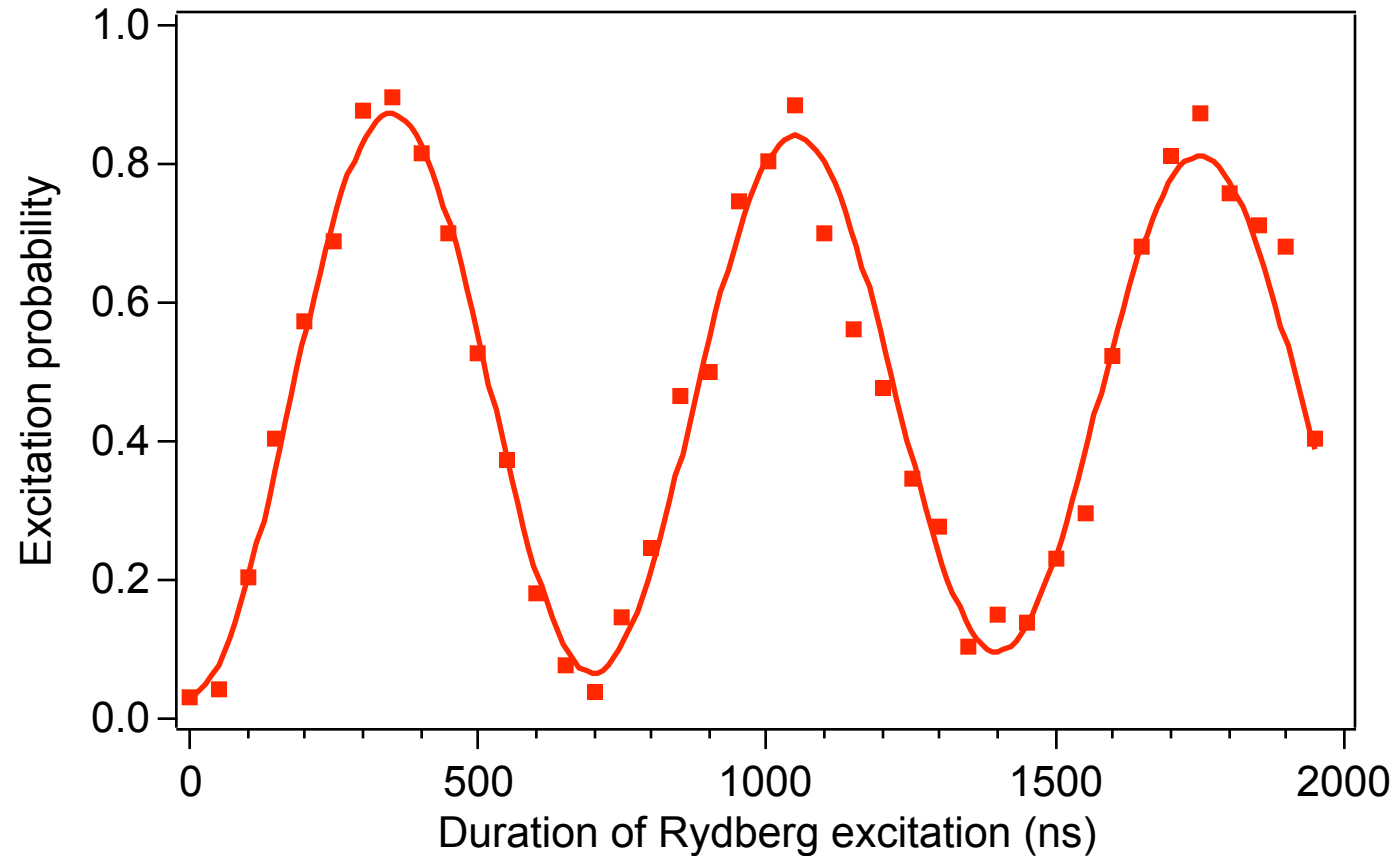
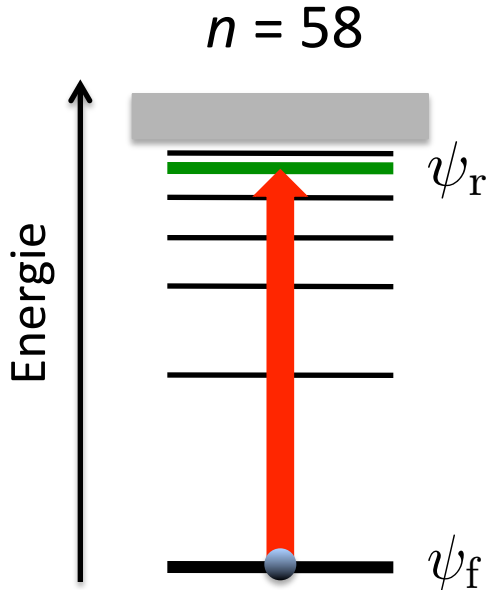
$$\psi_1, \psi_2, \psi_2, \psi_1, \dots, \psi_1$$
$$\Rightarrow \text{Probability } P_2 = \frac{N_2}{N}$$

Oscillation de Rabi sur un atome

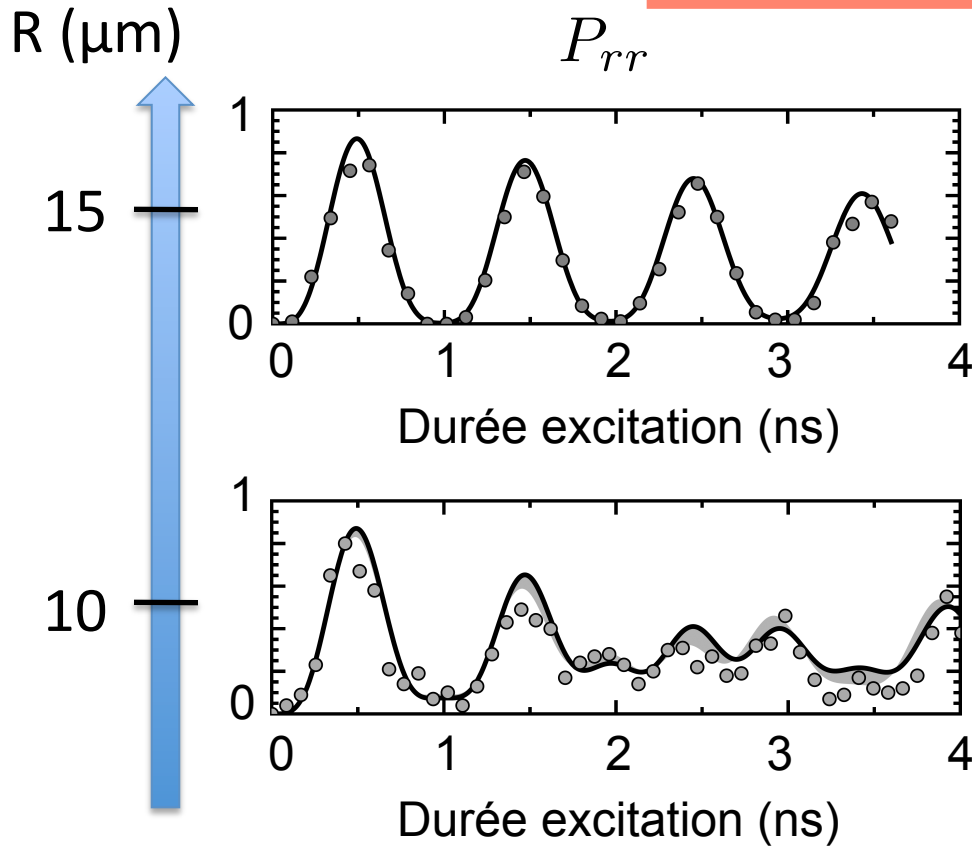
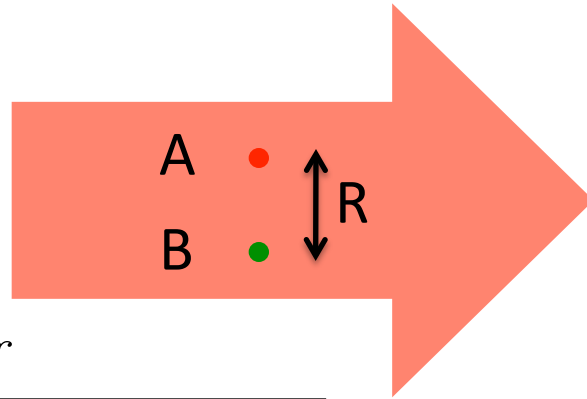


Proba excitation atome A seul

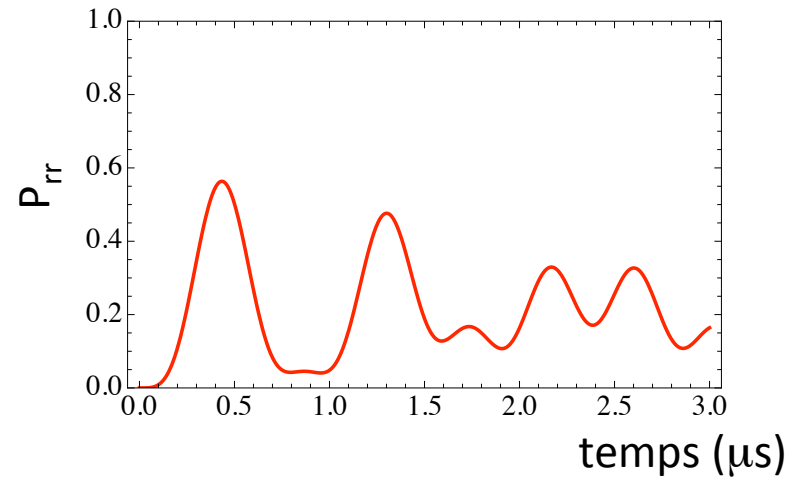
Répété 100 fois sur un atome



Excitation de deux atomes en interaction

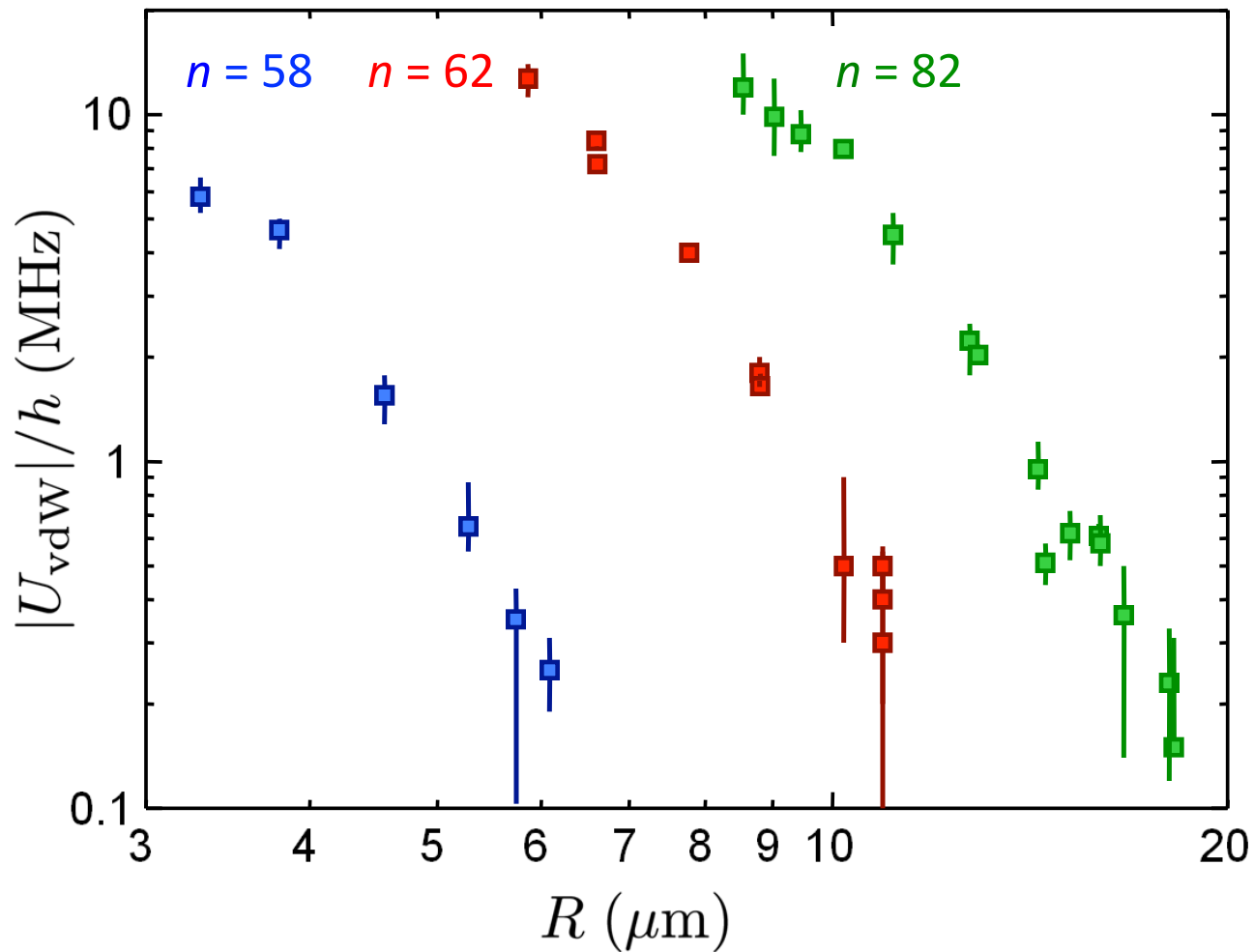


Théorie quantique
avec interaction:

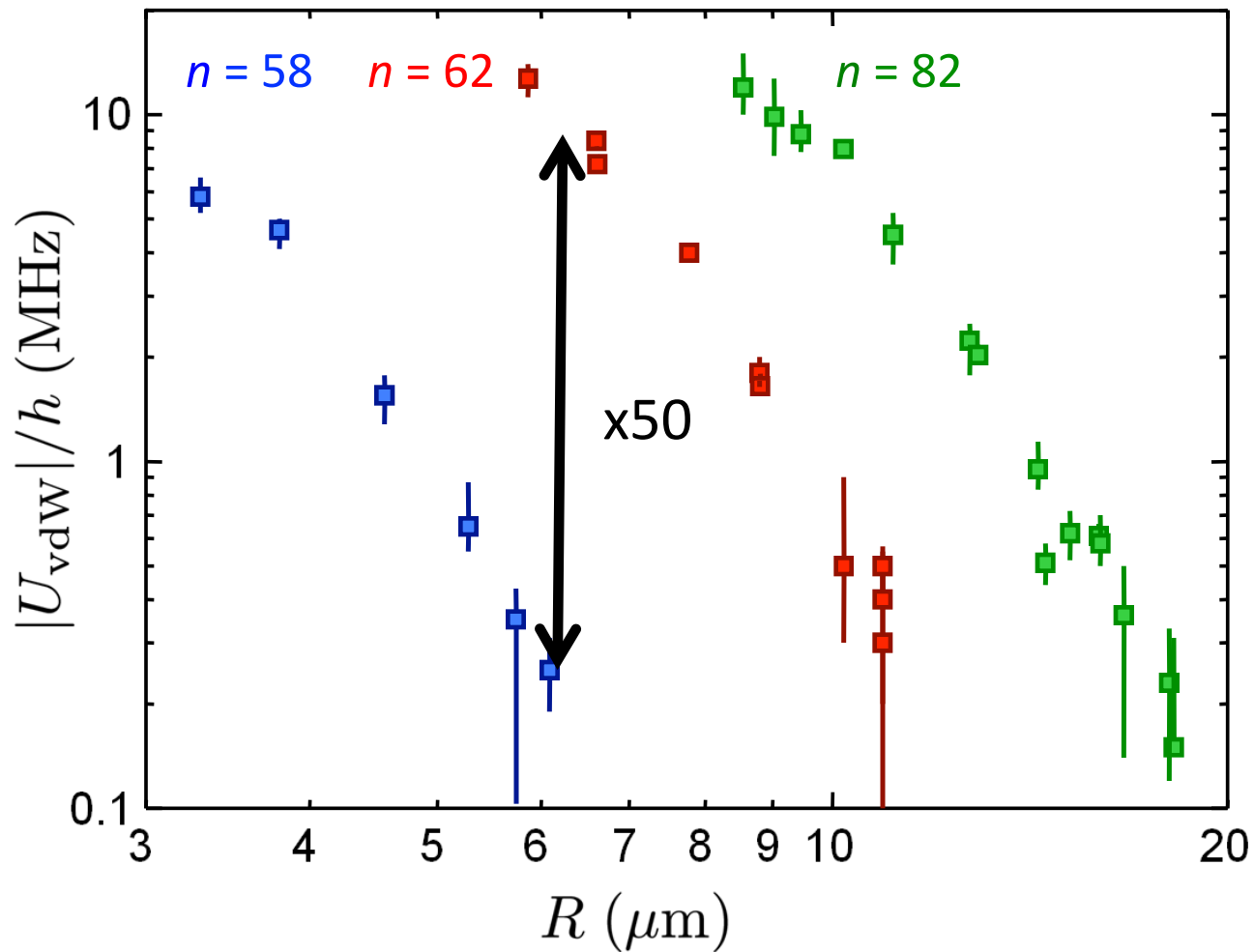


Analyse des « oscillations » \Rightarrow extraire U_{vdW}

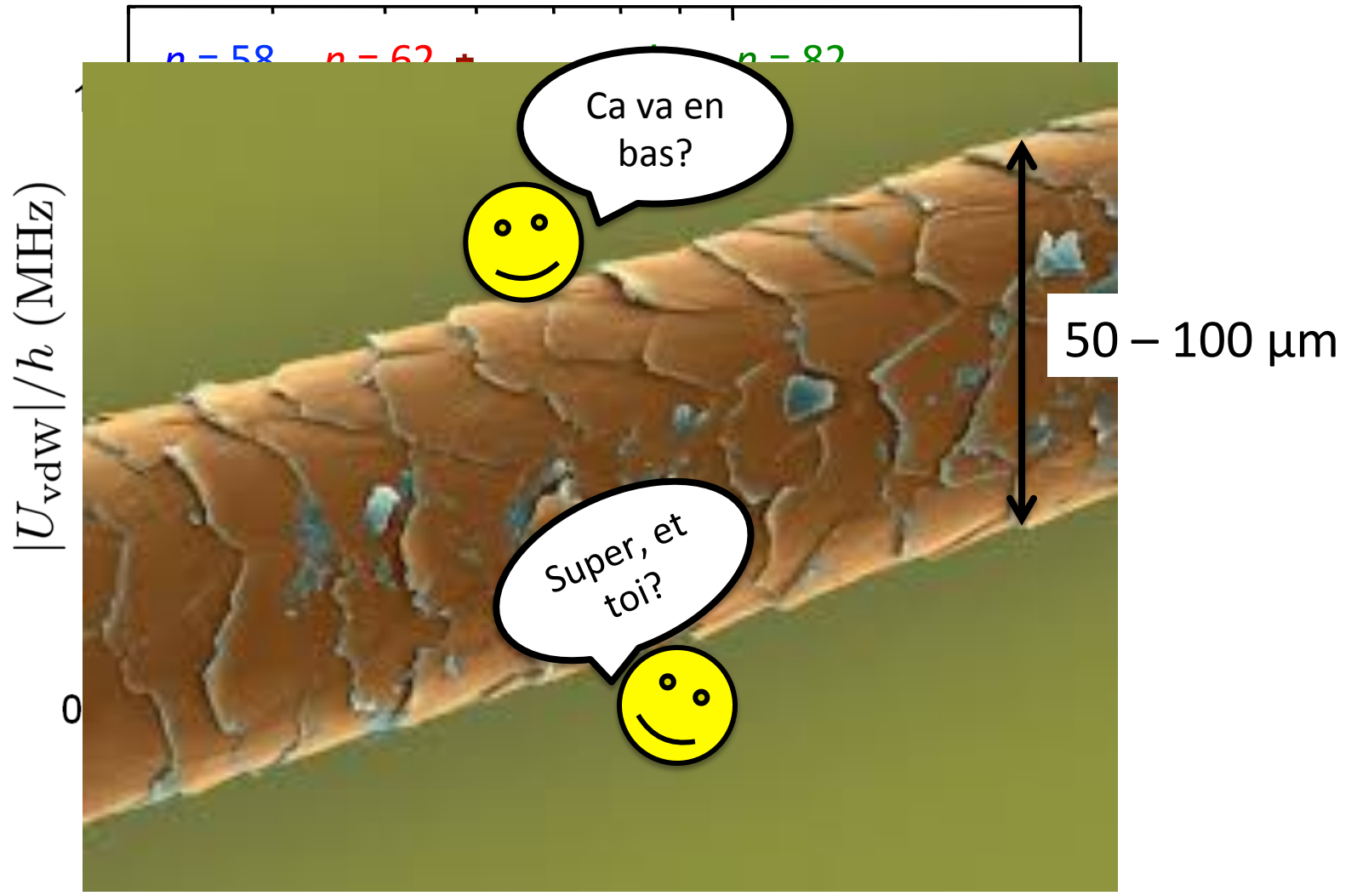
Mesure de l'interaction de Van der Waals entre 2 atomes



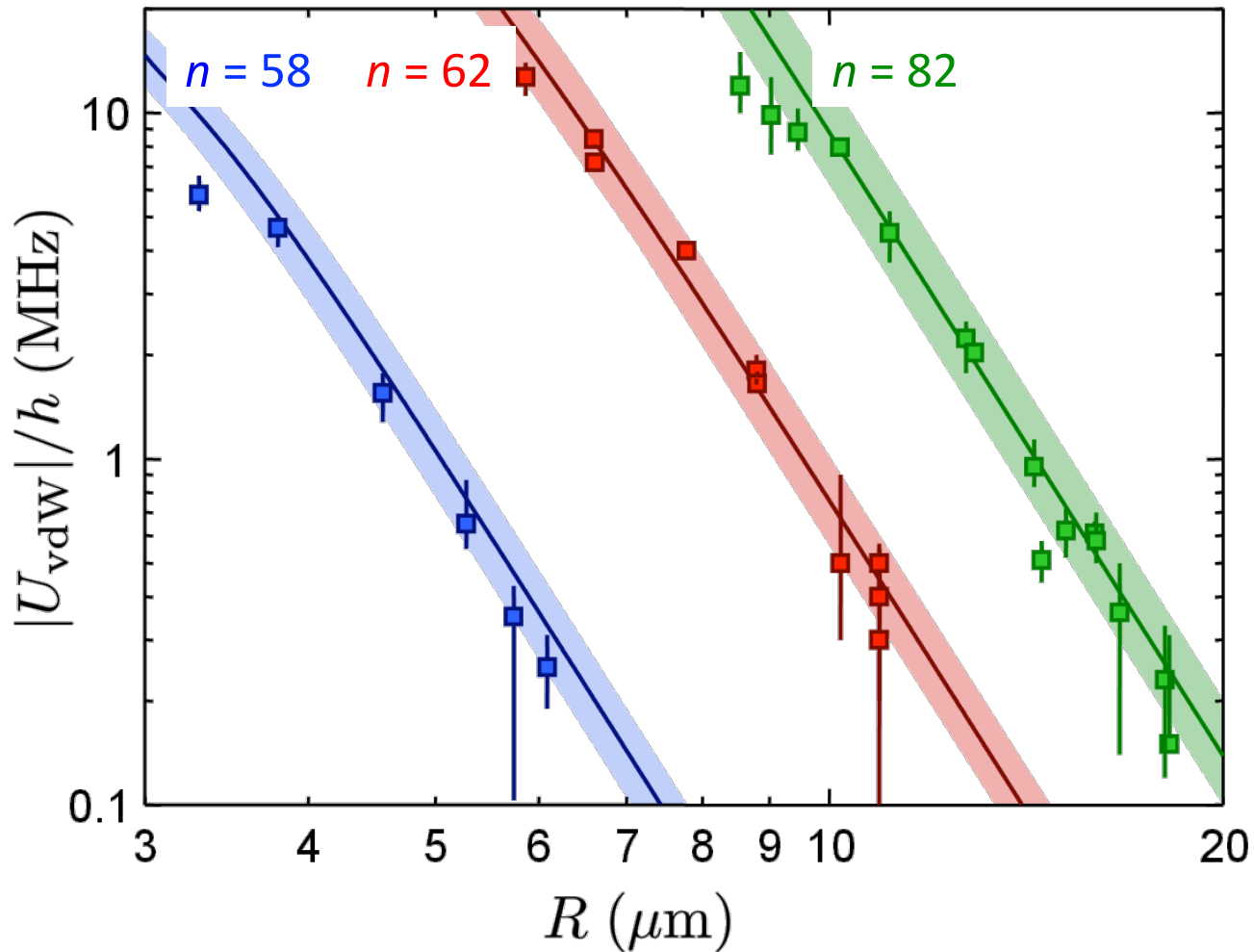
Mesure de l'interaction de Van der Waals entre 2 atomes



Mesure de l'interaction de Van der Waals entre 2 atomes

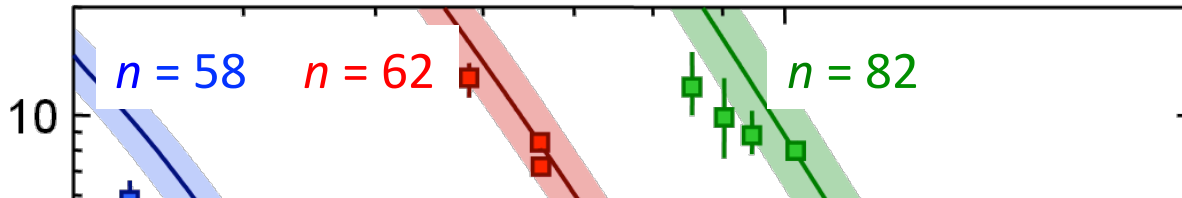


Mesure de l'interaction de Van der Waals entre 2 atomes



Théorie sans paramètre ajustable!

Mesure de l'interaction de Van der Waals entre 2 atomes



Conclusion: contrôle de l'interaction entre 2 atomes

État fondamental: pas d'interaction

Excite atomes: allume interaction pour une durée variable

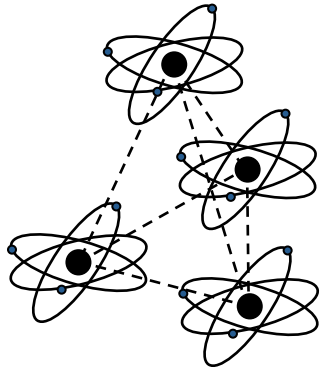
Choix de l'état n ou de R : contrôle l'amplitude

Les applications:

L'Ingénierie Quantique pour
La Simulation Quantique,
L'Ordinateur Quantique,
Les horloges ultra-précises.

Un des plus grands problèmes de la physique en 2015...

Microscopique



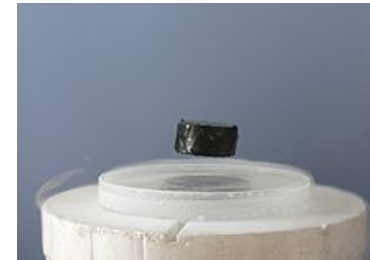
?



Macroscopique ($N = 10^{24}$)



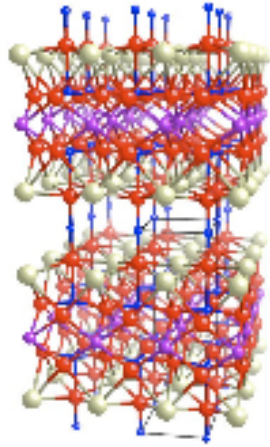
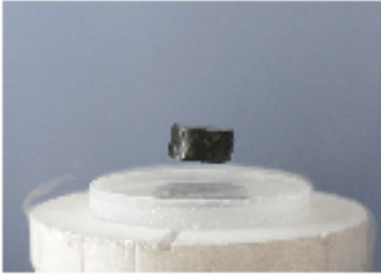
Physique quantique



Lois classiques (ou quantique...)
Ex: mécanique, thermodynamique...

Complexité: pour $N > 30 - 40$, calcul à partir des lois
microscopiques **IMPOSSIBLE...**

Simulation quantique: exemple de démarche



Observation phénomène compliqué

Ex: supraconductivité haute T_c

expérience

simplification



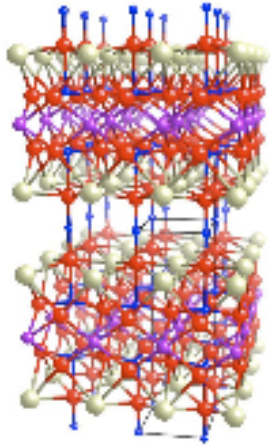
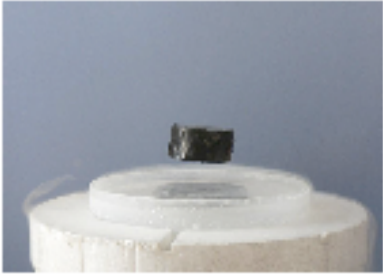
H modèle

$$H_{\text{modèle}} = - \sum_{i,j} J_{ij} a_i^\dagger a_j + \sum_i g(a_i^\dagger)^2 (a_i)^2$$


Calculer $H_{\text{modèle}}$
 \Rightarrow ?

Calculs trop durs...

Simulation quantique: exemple de démarche



Observation phénomène compliqué

Ex: supraconductivité haute T_c

expérience

simplification

H modèle

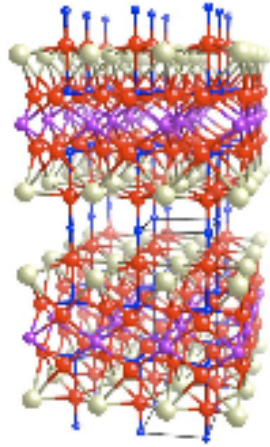
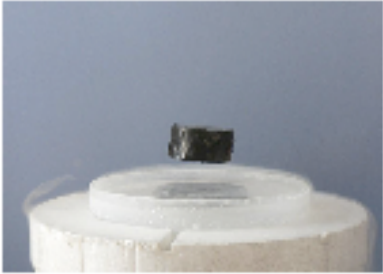
$$H_{\text{modèle}} = - \sum_{i,j} J_{ij} a_i^\dagger a_j + \sum_i g(a_i^\dagger)^2 (a_i)^2$$

Labo...

Simulateur quantique =
Ingénierie ensemble
d'atomes gouvernés par

$H_{\text{modèle}}$

Simulation quantique: exemple de démarche



Observation phénomène compliqué
Ex: supraconductivité haute T_c

simplification

expérience

H modèle

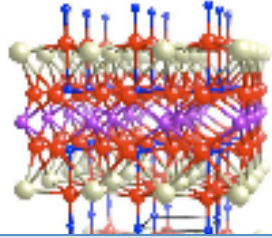
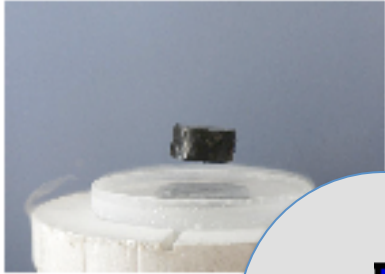
$$H_{\text{modèle}} = - \sum_{i,j} J_{ij} a_i^\dagger a_j + \sum_i g(a_i^\dagger)^2 (a_i)^2$$

Labo...

Simulateur quantique =
Ingénierie ensemble
d'atomes gouvernés par
 $H_{\text{modèle}}$

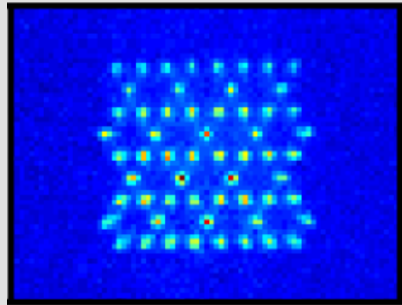
Résultat mesure sur
simulateur: **état**
fondamental = supra?

Simulation quantique: exemple de démarche

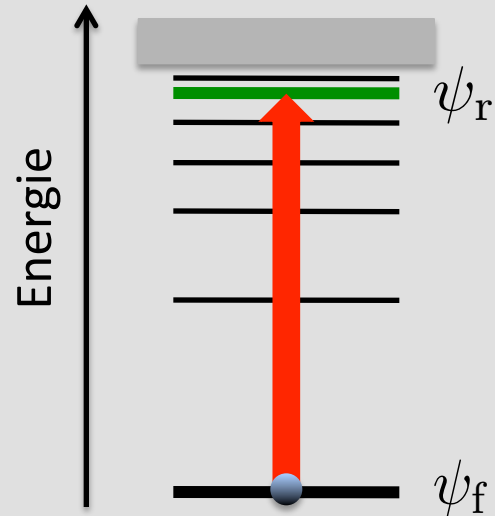


Observation phénomène compliqué

à haute T_c



+ interaction vdW



exp

e

$$\sum_i g(a_i^\dagger)^2 (a_i)^2$$

Réalise en pratique:

Résultat
simula

$$\hat{H} = -\hbar\Delta \sum_k \sigma_z^{(k)} + \hbar\Omega \sum_k \sigma_x^{(k)} + \sum_{k,m} V_{km} \hat{n}_k \hat{n}_m$$

ique =
semble

fondamental = supra?

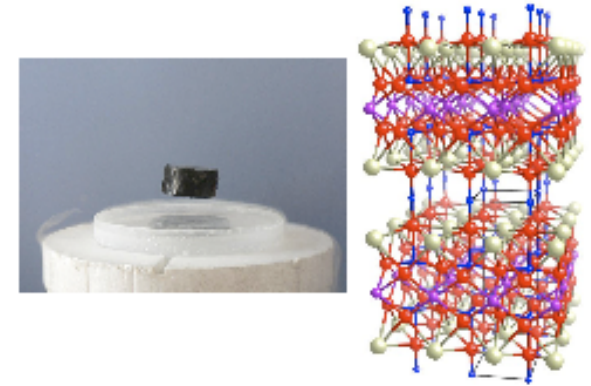
d'atomes gouvernés par

H_{model}

Qu'est ce que l'on peut simuler et à quoi ça peut servir...

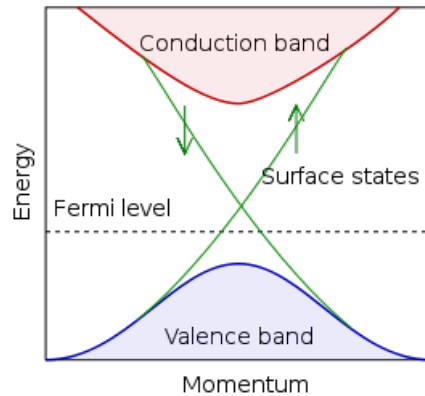
Supra-conductivité haute T_c

Vers le stockage de l'électricité?



Propriétés de conduction des métaux

influence du désordre et des interactions



Vers des métaux meilleurs conducteurs électriques?

Magnétisme quantique

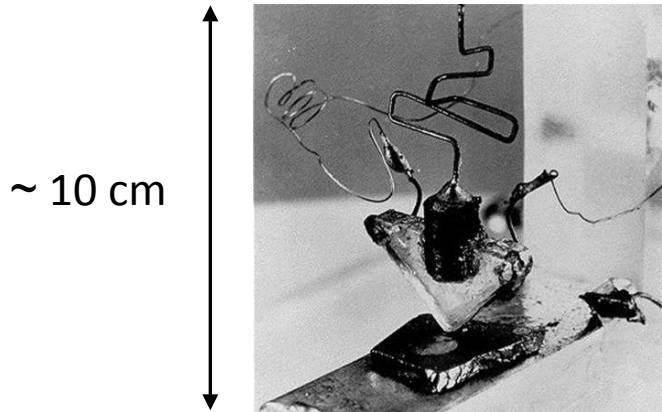
vers de nouveaux aimants pour moteurs électriques, stockage information...?



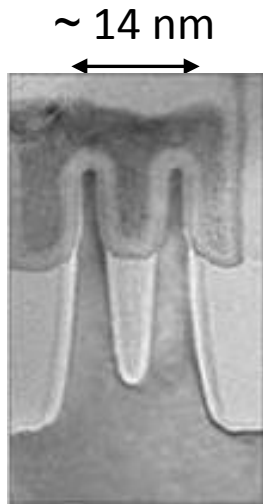
Les applications:

L'Ingénierie Quantique pour
La Simulation Quantique,
L'Ordinateur Quantique,
Les horloges ultra-précises.

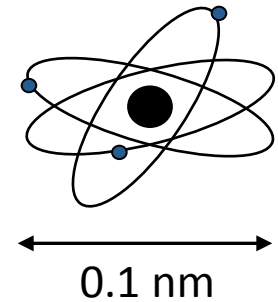
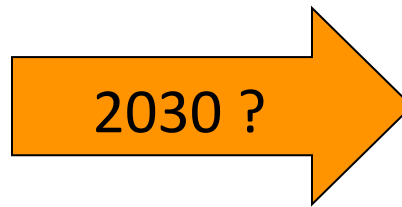
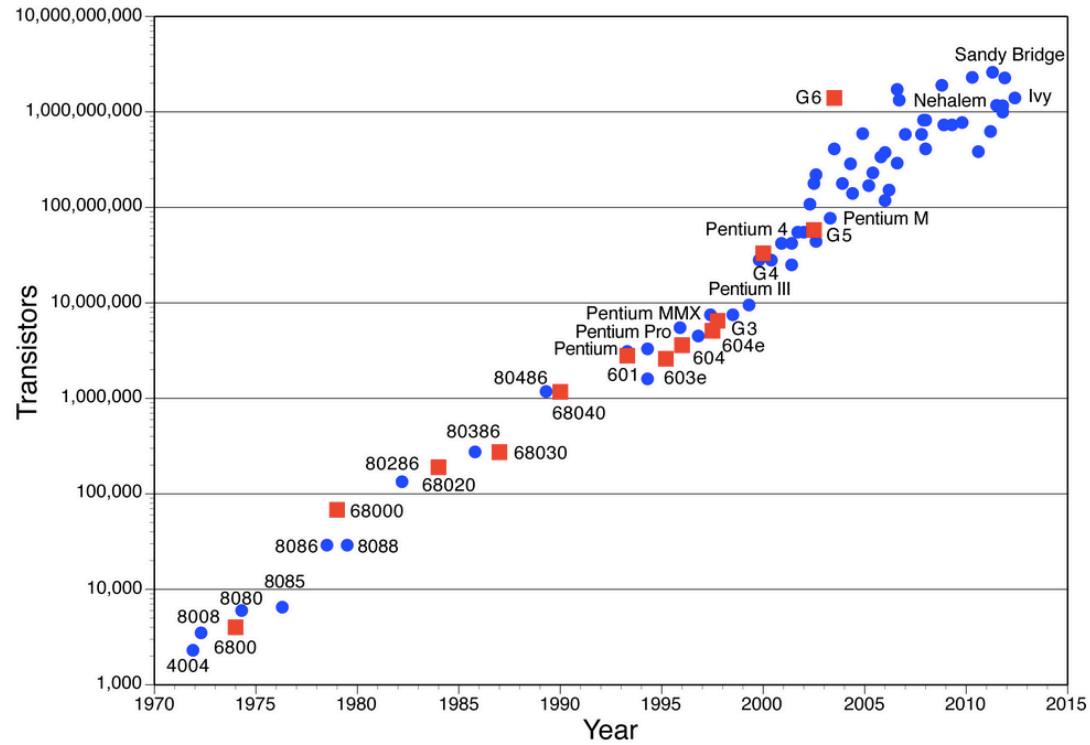
La course à la miniaturisation



Bardeen, Brattain & Shockley, 1947



Intel
2015



En dessous du nm, « le monde est quantique »
 ⇒ nouvelle façon de coder l'information, de calculer ?

Bonne nouvelle : ordinateur quantique = plus efficace...

Problèmes mathématiques « difficiles » :

Factorisation en nombres premiers (ex: $15 = 3 \times 5$)

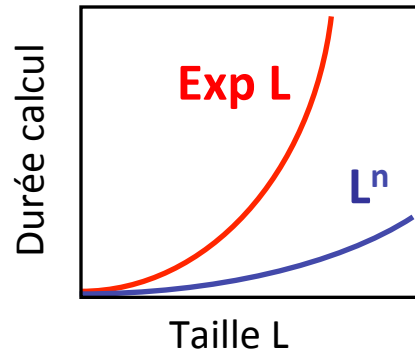
Difficulté \Rightarrow sécurité paiement internet,
cryptage information...

Recherche dans une liste. Ex : recherche Google

Logique Quantique diminue la « difficulté » des algorithmes



D. Deutsch (1985)

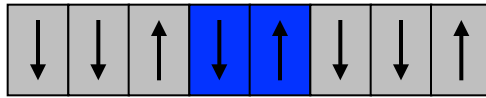


Factorisation: Shor (1994)

Recherche: Grover (1997)

Le binaire quantique

Information binaire classique



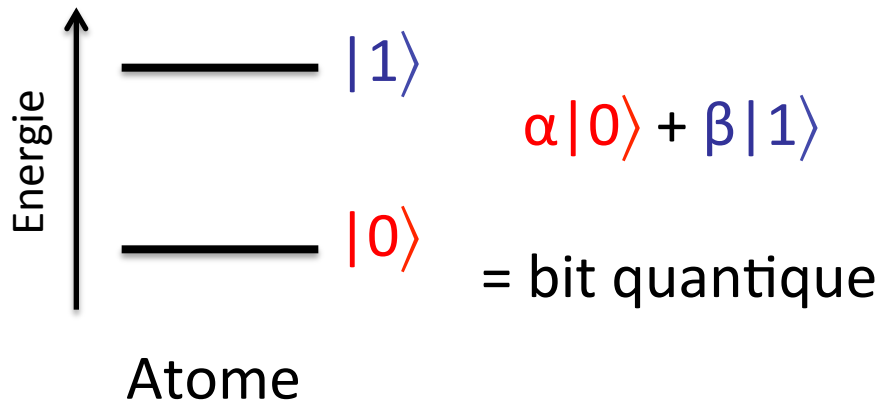
Aimantation

↓ = 0

↑ = 1

bit classique

Information binaire quantique



Registre quantique et **superposition**

Ex : 3 atomes

$$|X\rangle \propto |000\rangle + |100\rangle + |010\rangle + \dots + |111\rangle$$

$$\propto |0\rangle + |1\rangle + |2\rangle + \dots + |7\rangle$$

Sur N atomes, code 2^N nombres **simultanément**

Calcul de $f(X)$ (ex: X^2) =
en parallèle sur 2^N nombres

Donne tous les résultats...

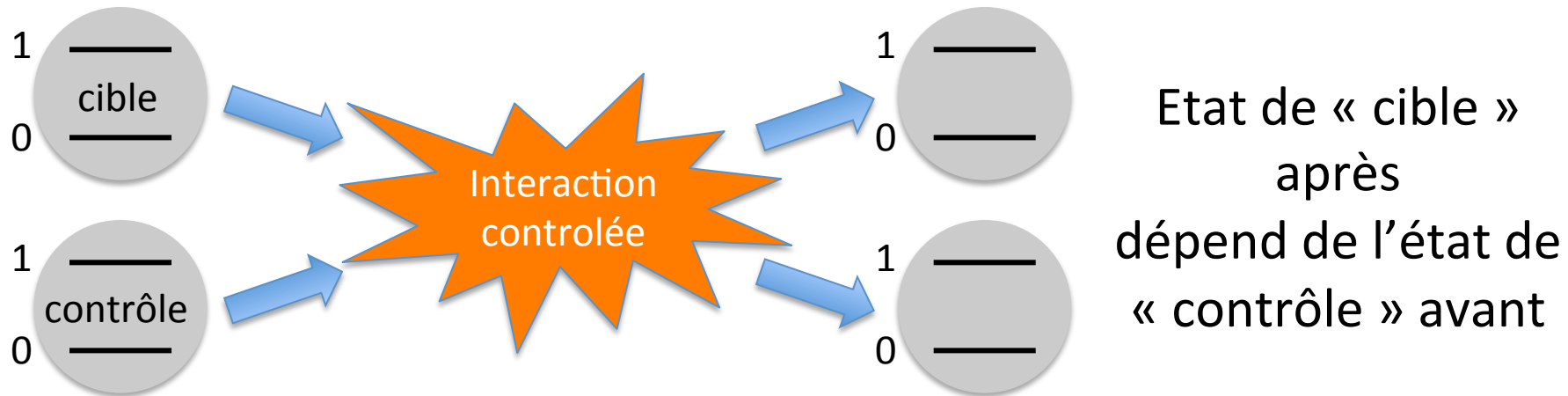
Portes logiques quantiques

Pour faire un calcul quantique il suffit de savoir agir

1. sur un bit quantique

Préparer: $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ (OK, oscillations de Rabi...)

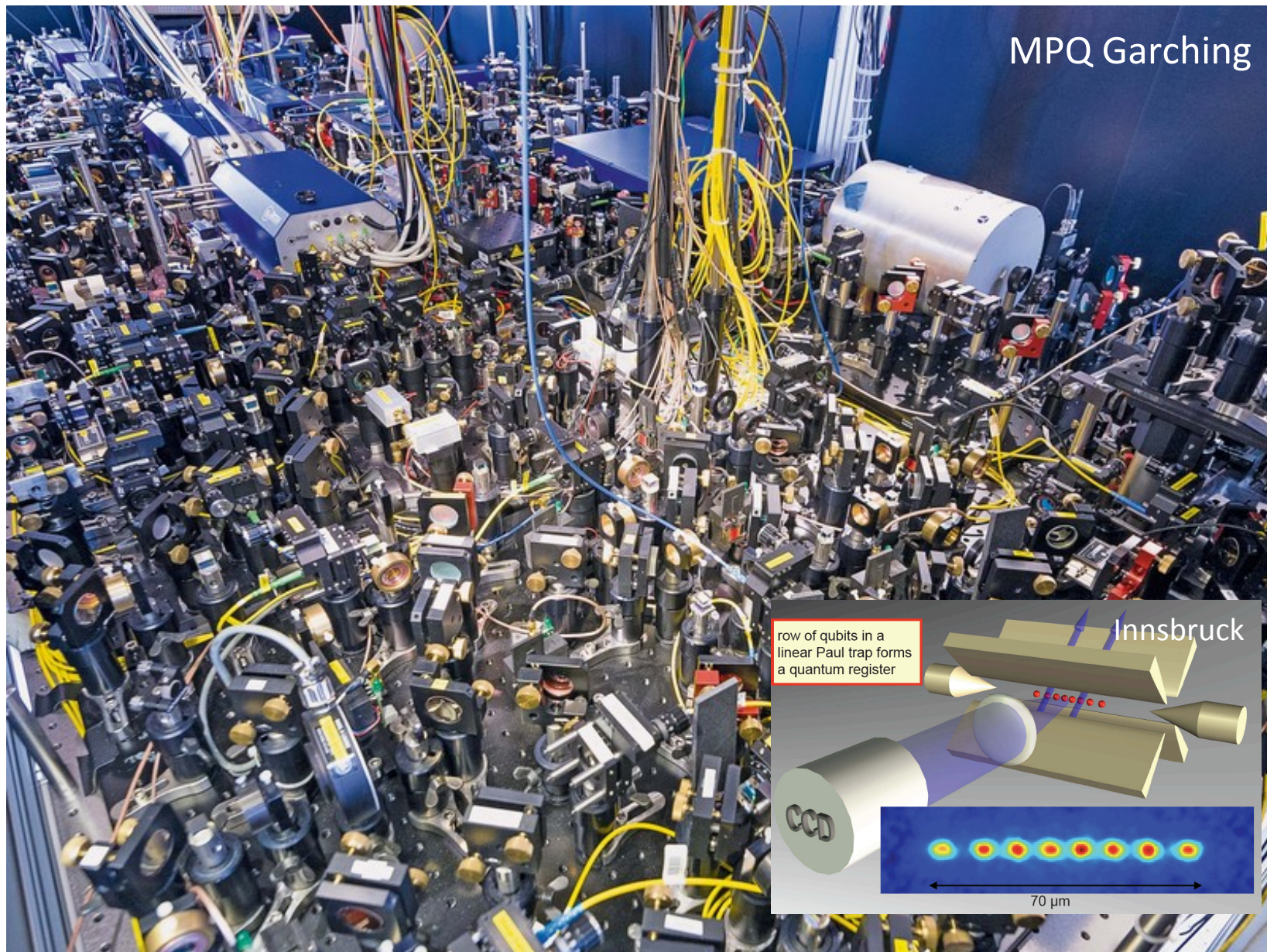
2. sur deux bits quantiques



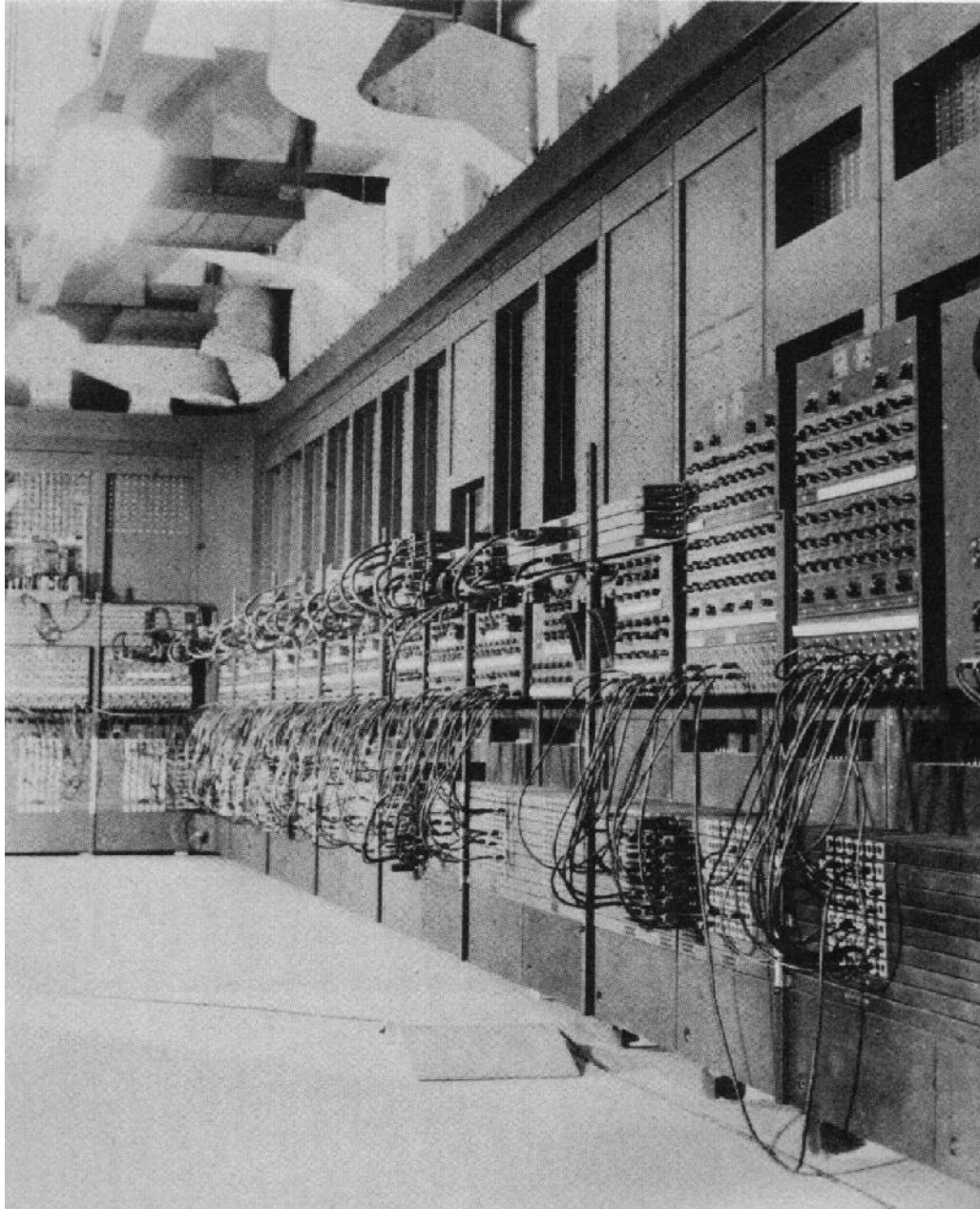
Séquence de portes = « circuit quantique »

Un ordinateur quantique de laboratoire: beaucoup de lasers, 1-2 M€, 5 ans de travail...pour 10 bits quantiques...

4 m



Rappel: l'ordinateur ENIAC en 1946 (USA)...



5000 additions / s
38 divisions / s

167 m², 30 tonnes
150 kW électrique !!



La controverse D-wave



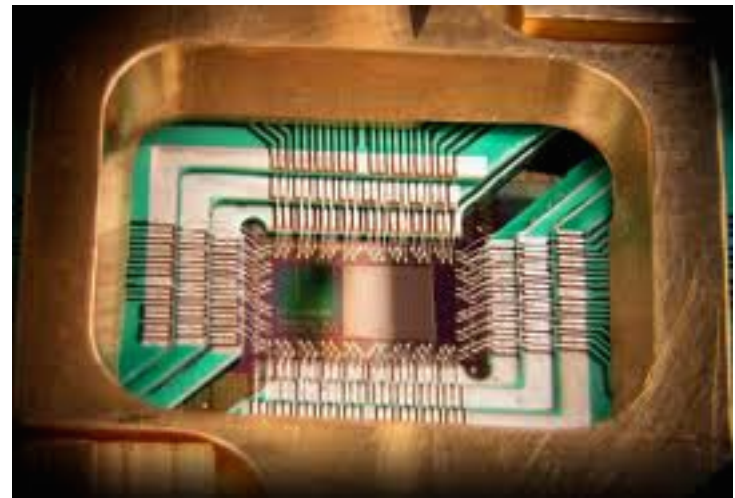
Entreprise canadienne (British Columbia)

2007 Annonce Ordi. Quant. à 16 qubits

2011 Annonce DW1 à 128 qubits

2013 Annonce DW2 à 512 qubits

Ensemble de circuits supra-
conducteurs à 20 mK



Mais est ce un ordinateur quantique...???

La controverse D-wave



Entreprise canadienne (British Columbia)

2007 Annonce Ordi. Quant. à 16 qubits

2011 Annonce DW1 à 128 qubits

2013 Annonce DW2 à 512 qubits

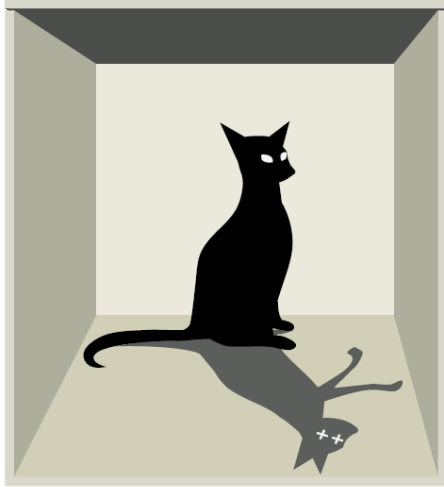
Ensemb
conc

The screenshot shows the top navigation bar of the Ars Technica website. The logo 'ars technica' is in the top left. Navigation links include 'MAIN MENU', 'MY STORIES: 25', 'FORUMS', 'SUBSCRIBE', and 'JOBS'. Below the navigation bar, there are two orange banners with the text 'Ars Technica has arrived in Europe. Check it out!'. The main article title is 'RISK ASSESSMENT / SECURITY & HACKTIVISM' followed by 'NSA preps quantum-resistant algorithms to head off crypto-apocalypse'. A sub-headline reads 'Quantum computing threatens crypto as we know it. The NSA is taking notice.' The author information is 'by Dan Goodin - Aug 21, 2015 1:02pm CEST'. At the bottom right, there are social media sharing buttons for Facebook (Share), Twitter (Tweet), and a comment count of 90.



En guise de conclusion...

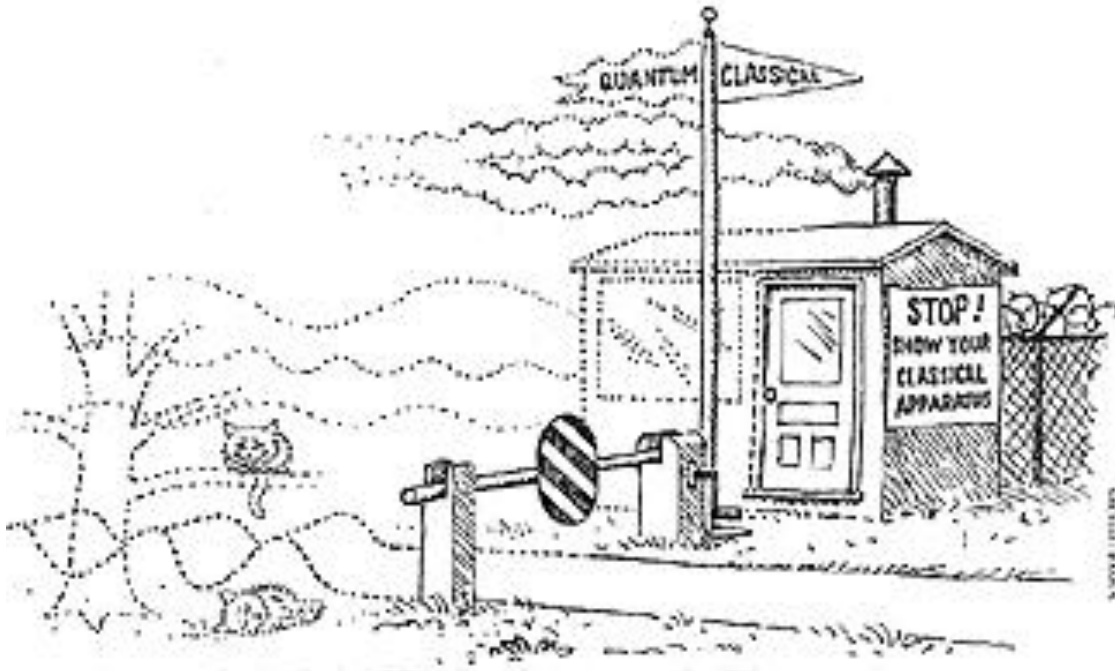
Pourquoi n'observe-t-on jamais un chat vivant et mort à la fois ?



Superposition quantique: OK pour 20 – 30 atomes

Chat = 10^{26} atomes...!!!

⇒ Superposition plus fragile pour grand N ?



Ou bien existe-t-il
**une transition entre
mondes
quantique et classique?**

En guise de conclusion...

« En prenant l'attitude que la poursuite d'un **idéal aussi fondamental** que l'obtention d'une seule particule atomique au repos dans l'espace est un **défi intellectuel qui en vaut vraiment la peine**, nous commençons des expériences dans cette direction »

H. Dehmelt *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 41, p. 233 (1978)