

Le Monde Quantique

**L3 PHYTEM
Bases de la Mécanique Quantique
Cours d'introduction**

C. Fabre

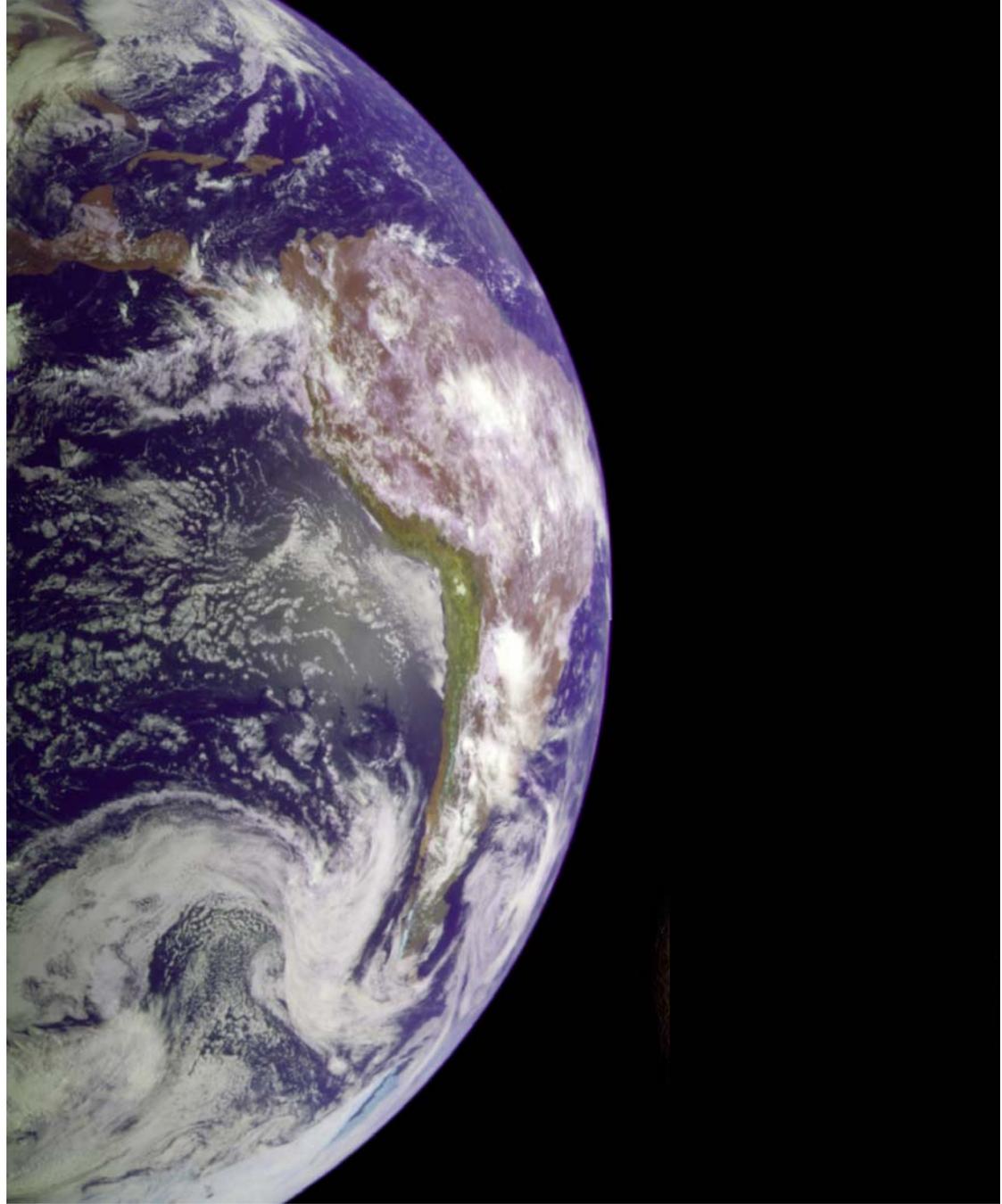
fabre@spectro.jussieu.fr

Ordres de grandeur

- échelle terrestre :

$$d \approx 10^7 \text{ m}$$

$$M \approx 10^{25} \text{ Kg}$$



- échelle terrestre :

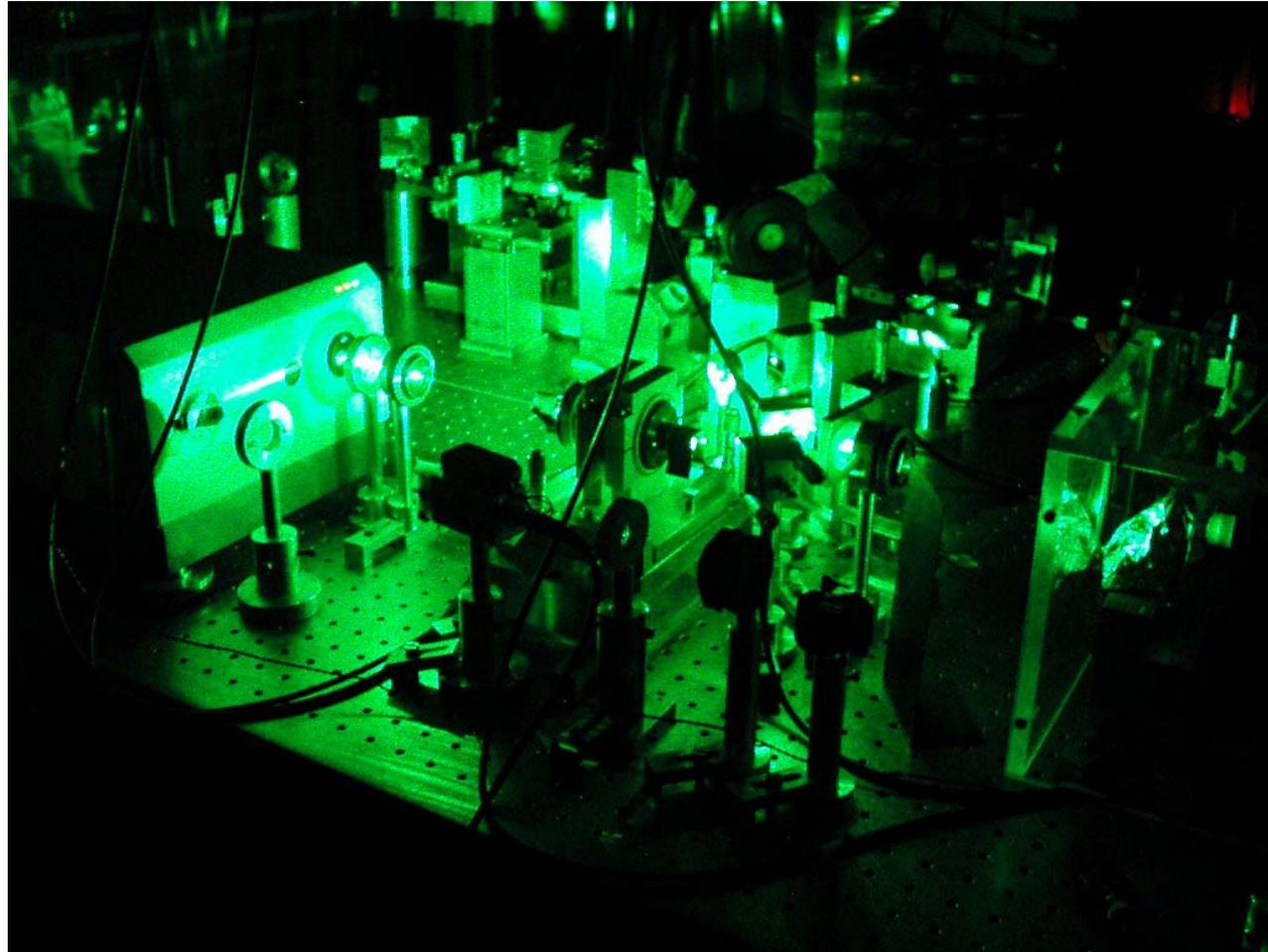
$$d \approx 10^7 \text{ m}$$

$$M \approx 10^{25} \text{ Kg}$$

- échelle humaine :

$$d \approx 10^{-1} \text{ m}$$

$$M \approx 1 \text{ Kg}$$



- échelle terrestre :

$$d \approx 10^7 \text{ m}$$

$$M \approx 10^{25} \text{ Kg}$$

- échelle humaine :

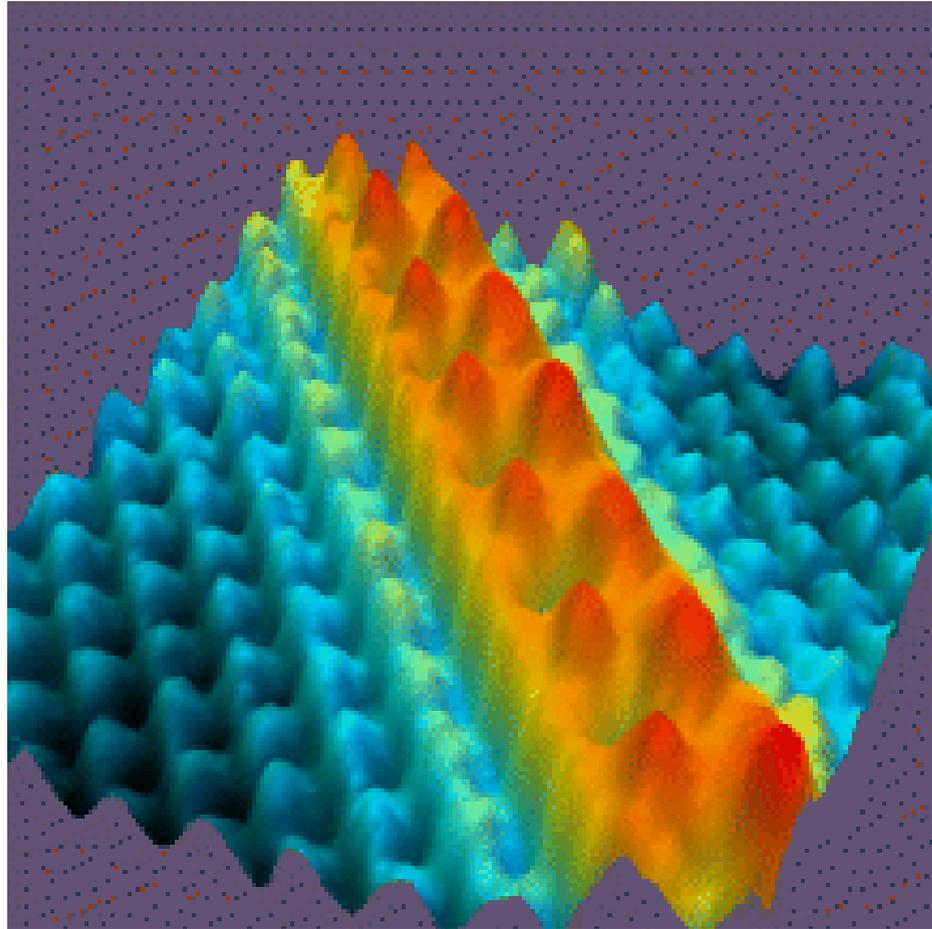
$$d \approx 10^{-1} \text{ m}$$

$$M \approx 1 \text{ Kg}$$

- échelle atomique :

$$d \approx 10^{-9} \text{ m}$$

$$M \approx 10^{-25} \text{ Kg}$$



1.1 Le monde microscopique

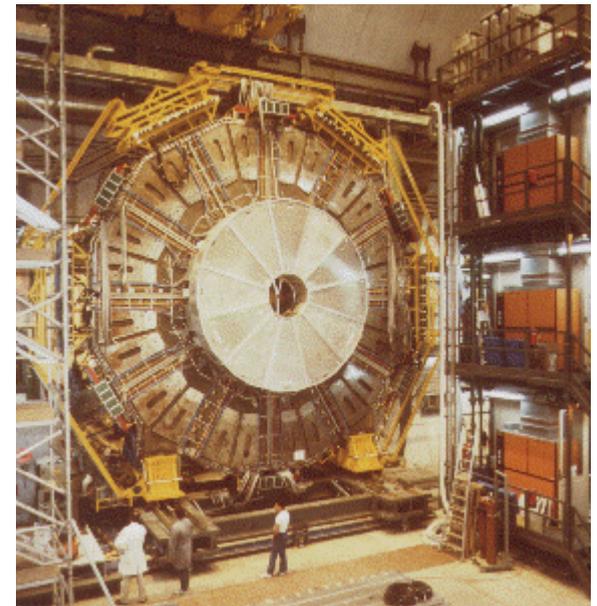
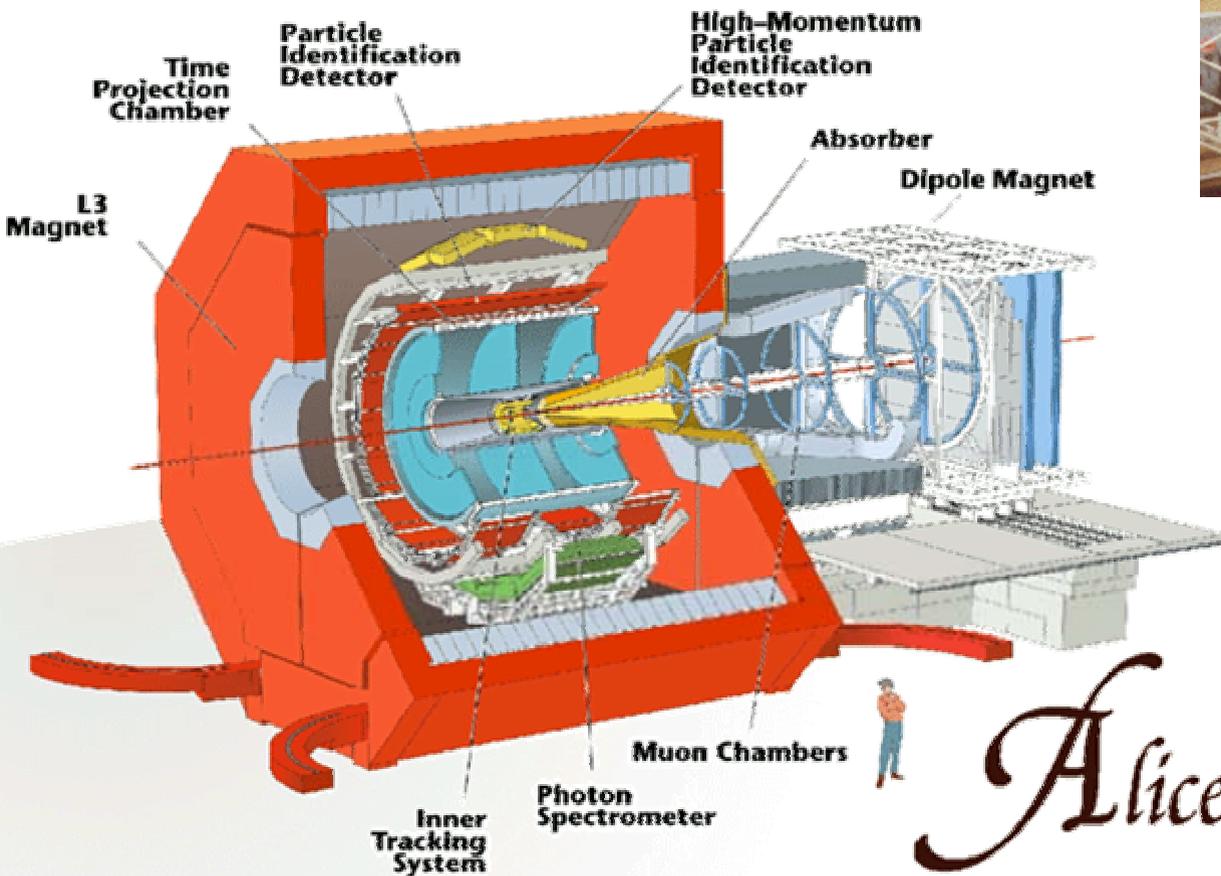
10^{-9} à 10^{-15} m

On peut voir par satellite les phénomènes à l'échelle terrestre

On peut maintenant « **voir** »
les particules microscopiques individuelles

Voir = être sensible à un phénomène physique localisé
induit par une particule microscopique unique

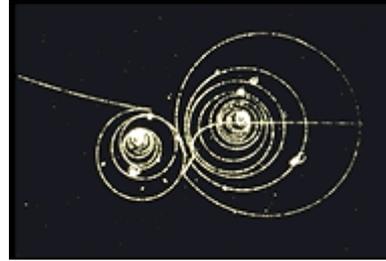
Particules élémentaires



Alice

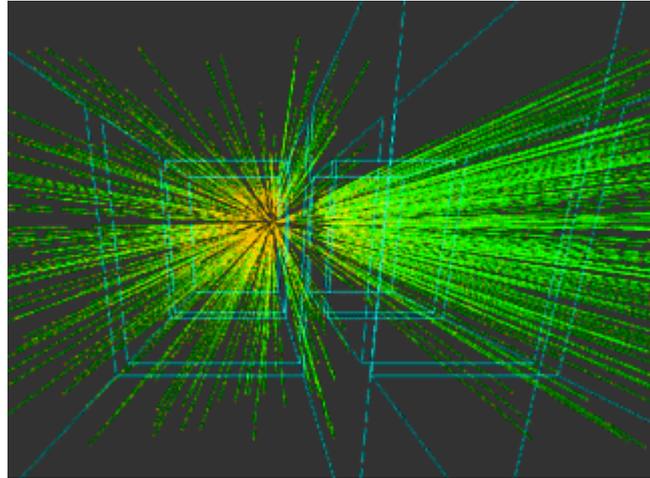
Particules très petites (10^{-15} m), mais de grande énergie :

Années 50 :



Chambre à bulle

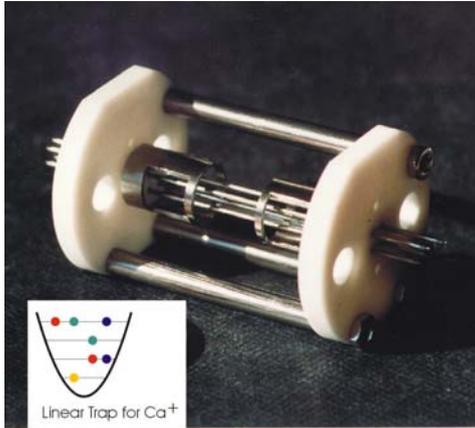
maintenant :



Chambre à fil
(Charpak)

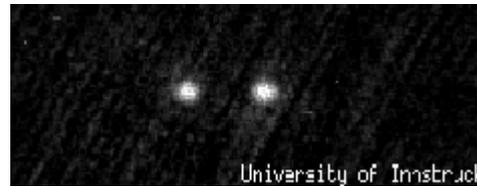
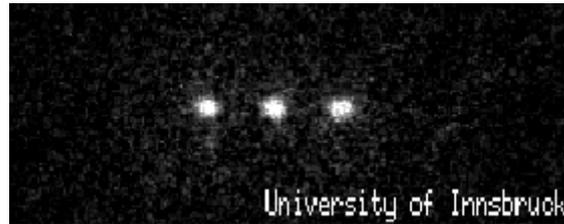
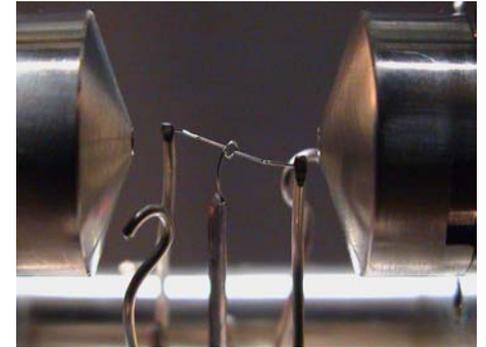


Ions individuels



Pièges à ions

(Hg^+)



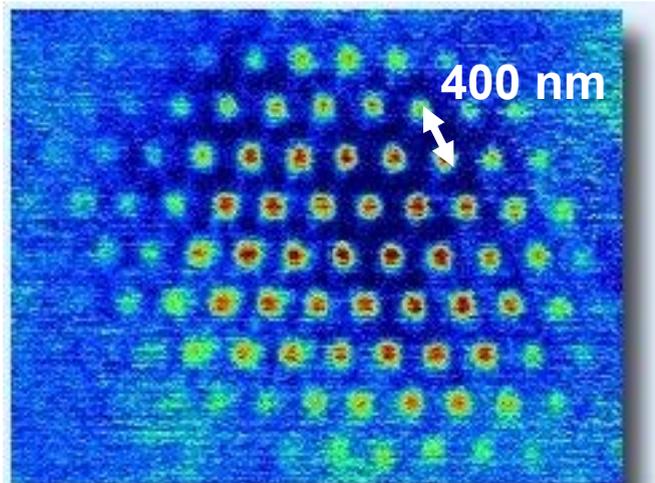
ion unique !

« nuages » d'atomes

Refroidissement et piégeage d'atomes par laser (Cohen-Tannoudji)



Atomes piégés



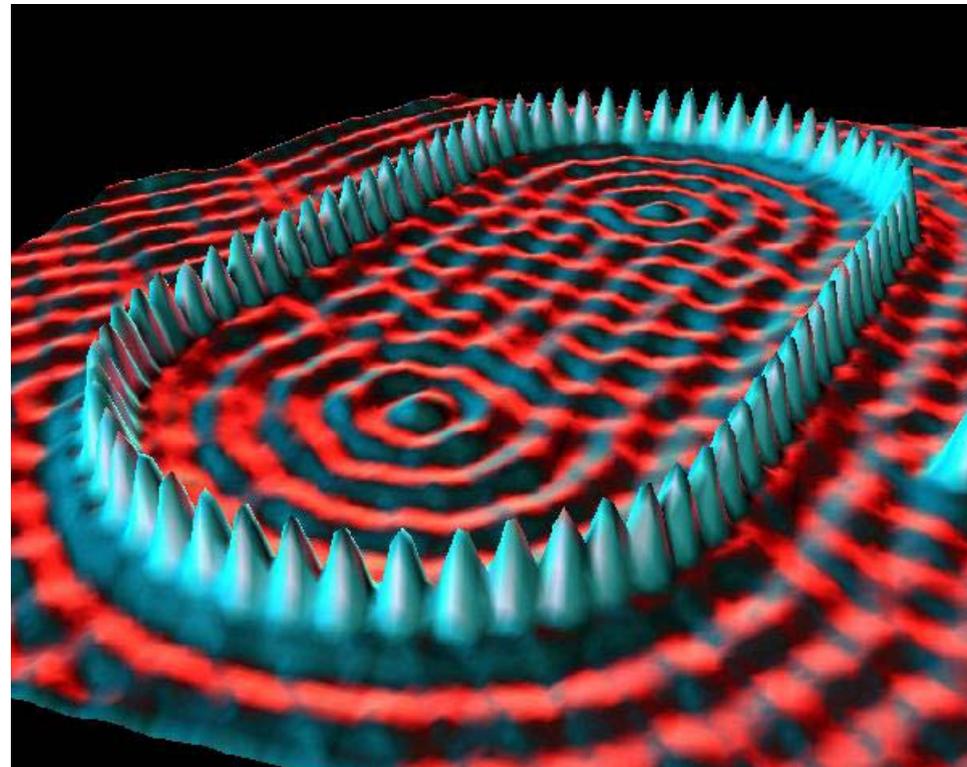
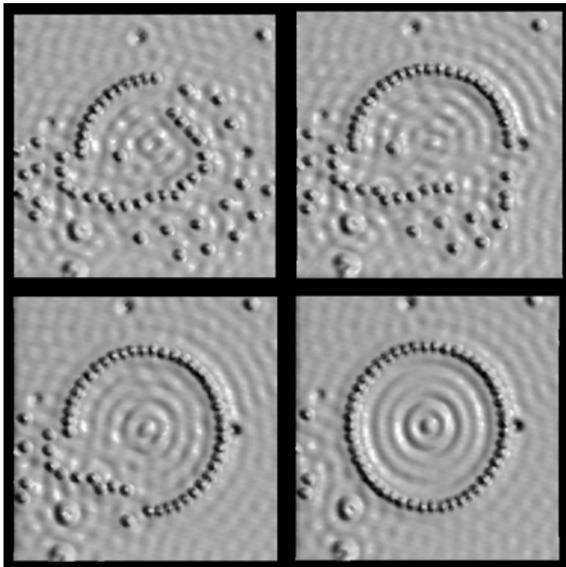
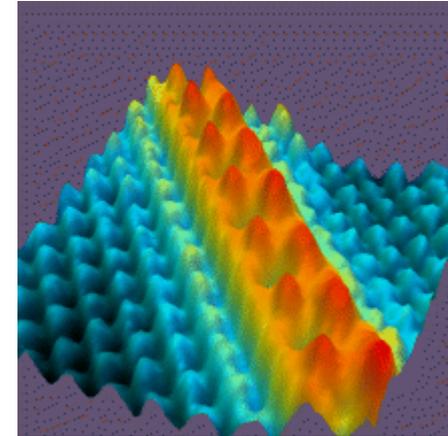
Atomes piégés sur un réseau lumineux

Atomes adsorbés sur une surface



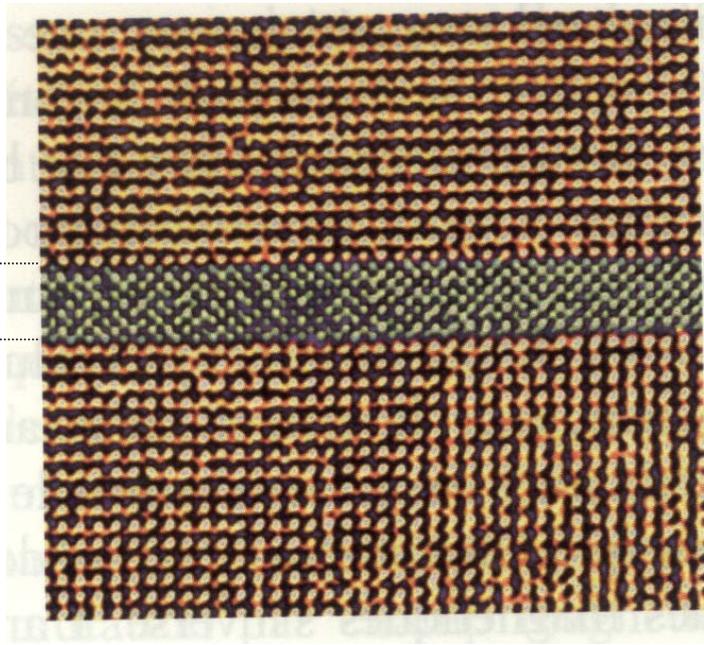
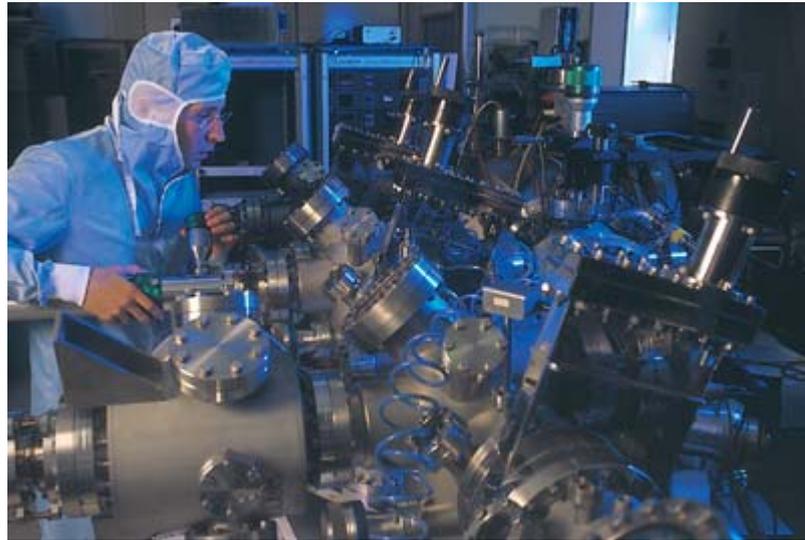
Microscope à effet tunnel
ou à force atomique : résolution
meilleure que 0,1 nm

Possibilité de manipulation
des atomes individuels



Atomes en volume: des cristaux fabriqués à la couche atomique près

Dispositifs d'épitaxie



2,2 nm

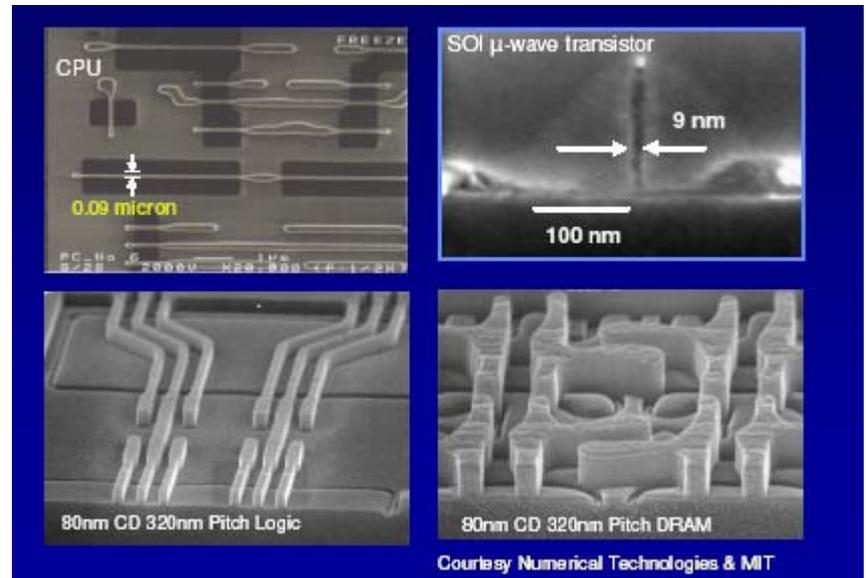


(0,39 nm entre couches)

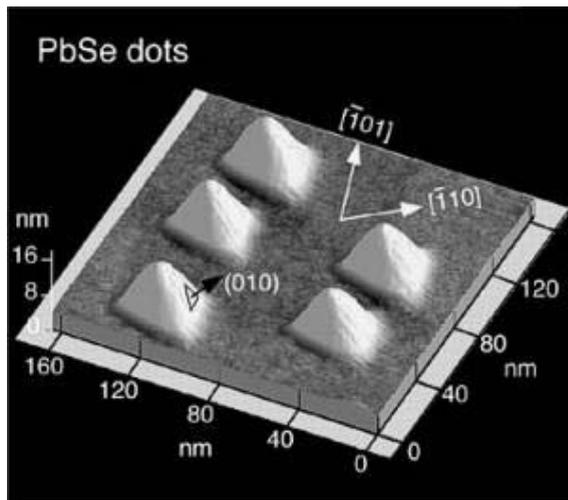
Fabrication d'objets nanométriques



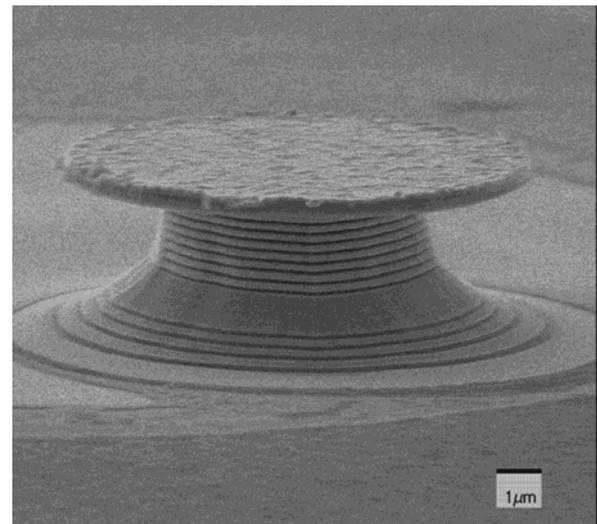
Dispositifs de micro-lithographie



microprocesseurs

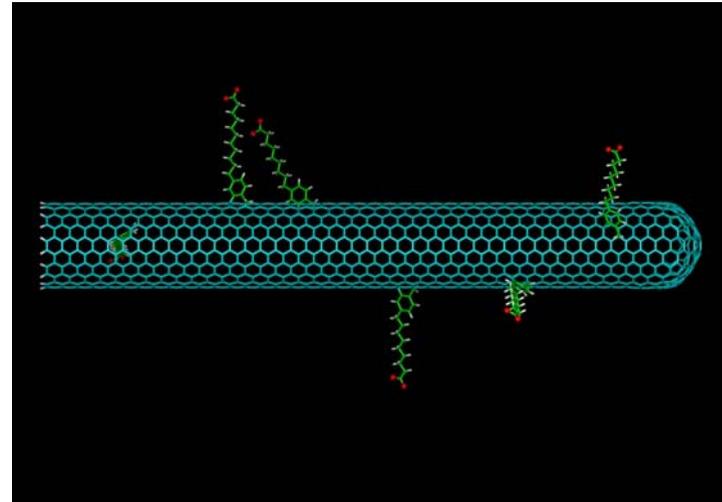


Boîtes quantiques

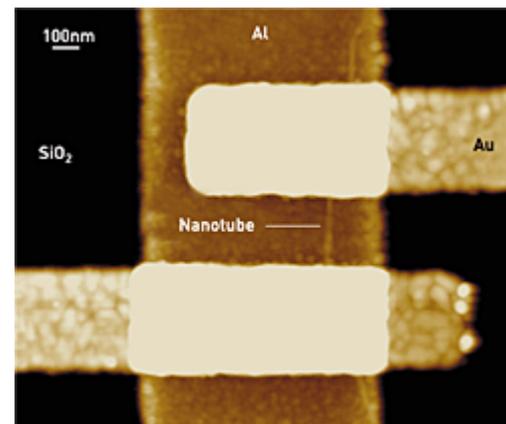
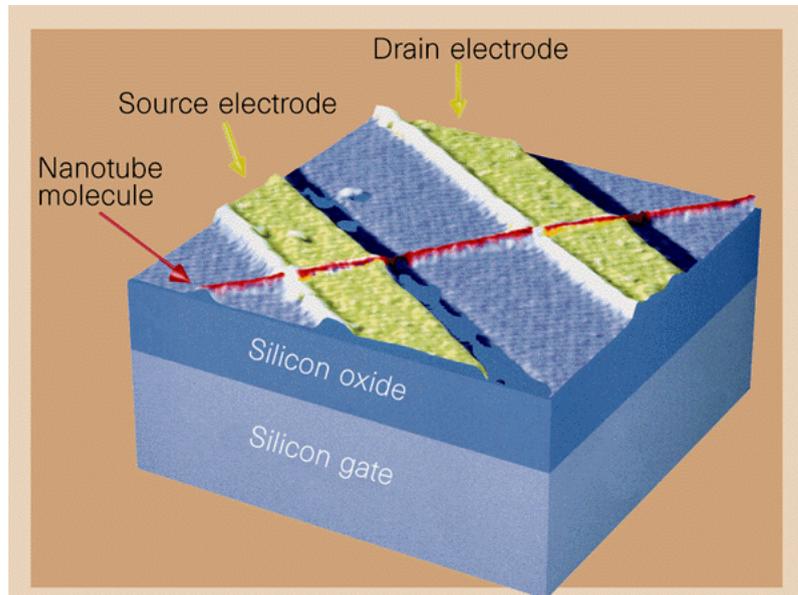


Électronique à quelques électrons

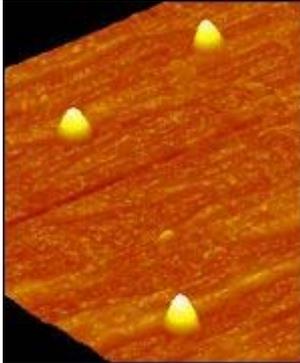
Nanotube de carbone



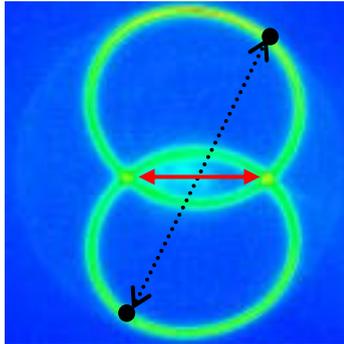
Transistor à nanotube de carbone



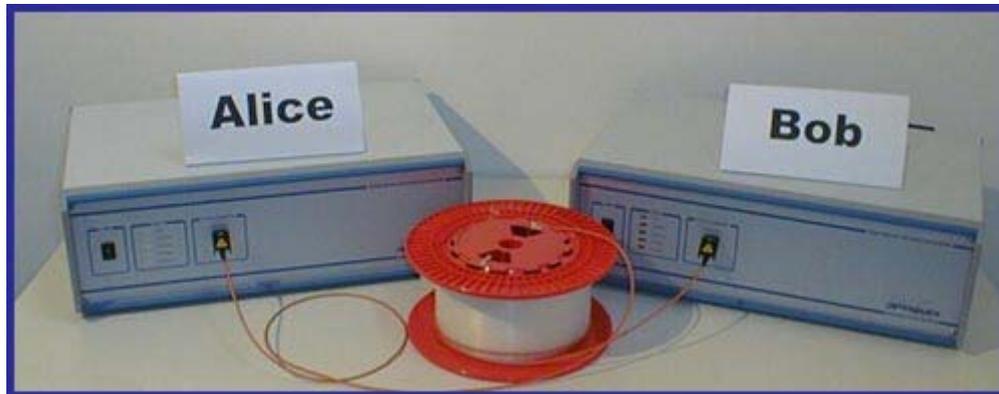
Lumière contrôlée au photon près



Émetteurs de photons uniques



Émetteurs de photons jumeaux ou « intriqués »



Dispositif commercial de cryptographie quantique

Tous les phénomènes microscopiques sont régis par la

Mécanique quantique

accord théorie expérience, pour l'instant, jamais mis en défaut

(même avec des expériences très précises)

règles « étranges », éloignées de l'expérience quotidienne

débats sur l'interprétation de ces règles

accord sur les prévisions physiques

Nécessité de se forger une « intuition quantique »

1.2 Du microscopique au macroscopique

Monde macroscopique = accumulation d'un nombre énorme de phénomènes microscopiques

23 ordres de grandeurs franchis par des **moyennes statistiques**

(d'où l'importance de la **physique statistique**)

La Mécanique Quantique fixe la valeur des **constantes caractéristiques** des objet macroscopiques (chaleur spécifique, densité, conductivité électrique et thermique ...)

Certains **phénomènes de base** ont une origine quantique (stabilité de la matière, transitions de phase, réactions chimiques, classification des éléments ...)

Existence de « **gros objets quantiques** » (supraconducteurs, superfluides, étoiles à neutrons ...)

Existence de **fluctuations quantiques** autour de la moyenne statistique

1.3 Les caractéristiques essentielles du monde quantique

1.3.1 pour la lumière

a) La lumière est une **onde classique** qui se comporte parfois comme une **particule classique**

$$E = h \nu$$

énergie

fréquence

$$(\hbar = h/2\pi)$$

formule
d'Einstein

$$E = \hbar \omega$$

énergie

pulsation

quantité de mouvement

$$|\vec{p}| = \frac{h}{\lambda}$$

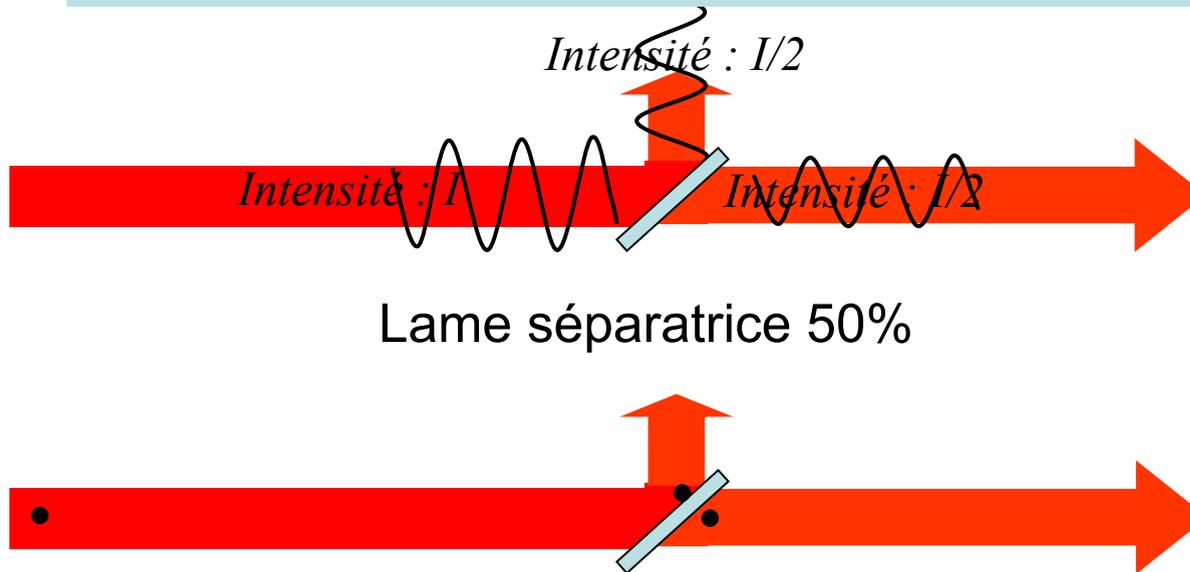
longueur d'onde

quantité de mouvement

vecteur d'onde

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

b) Aspect **probabiliste** des phénomènes corpusculaires



Lame séparatrice 50%

On ne peut pas couper en deux les photons !

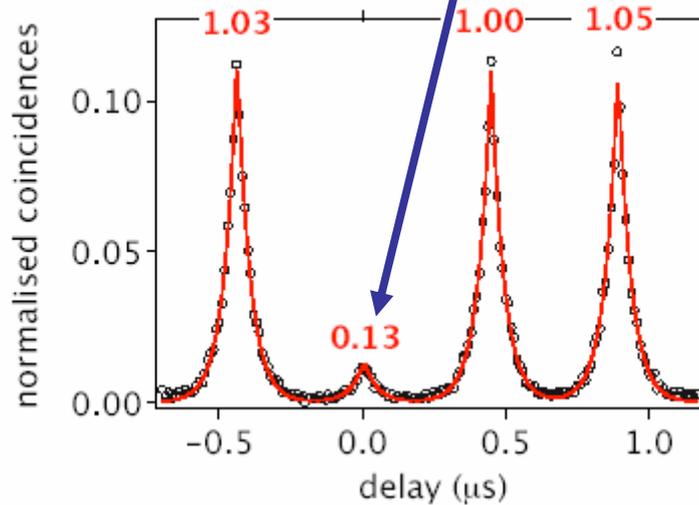
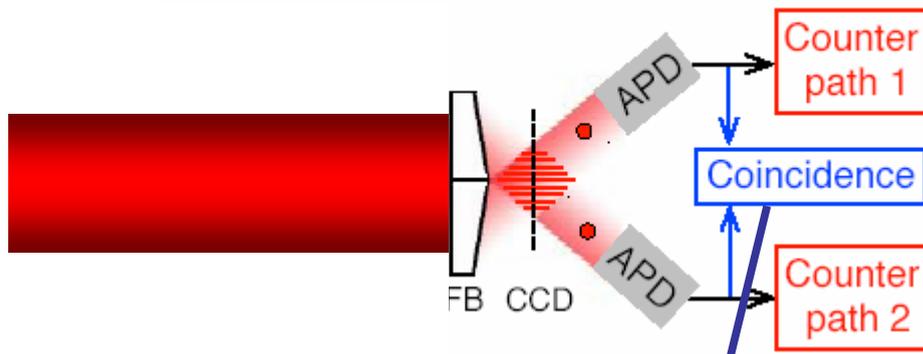
Phénomène aléatoire :

Probabilité 0,5 pour le photon d'être réfléchi, 0,5 d'être transmis

« Dieu joue à pile ou face ! »



Interférences photon par photon



Voir film sur :
http://www.physique.ens-cachan.fr/franges_photon/interference.htm

1.3.2 pour la matière

a) La matière est formée de **particules classiques** qui se comportent parfois comme une **onde classique**

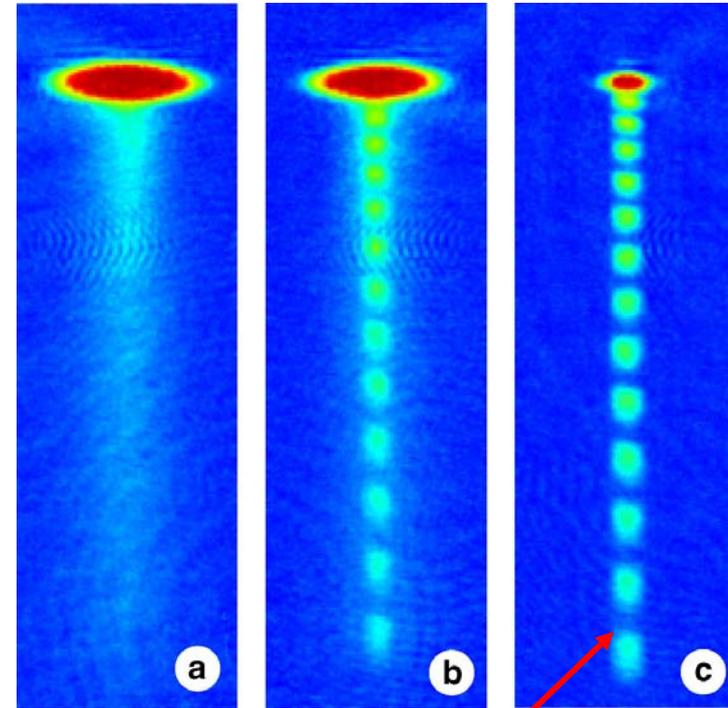
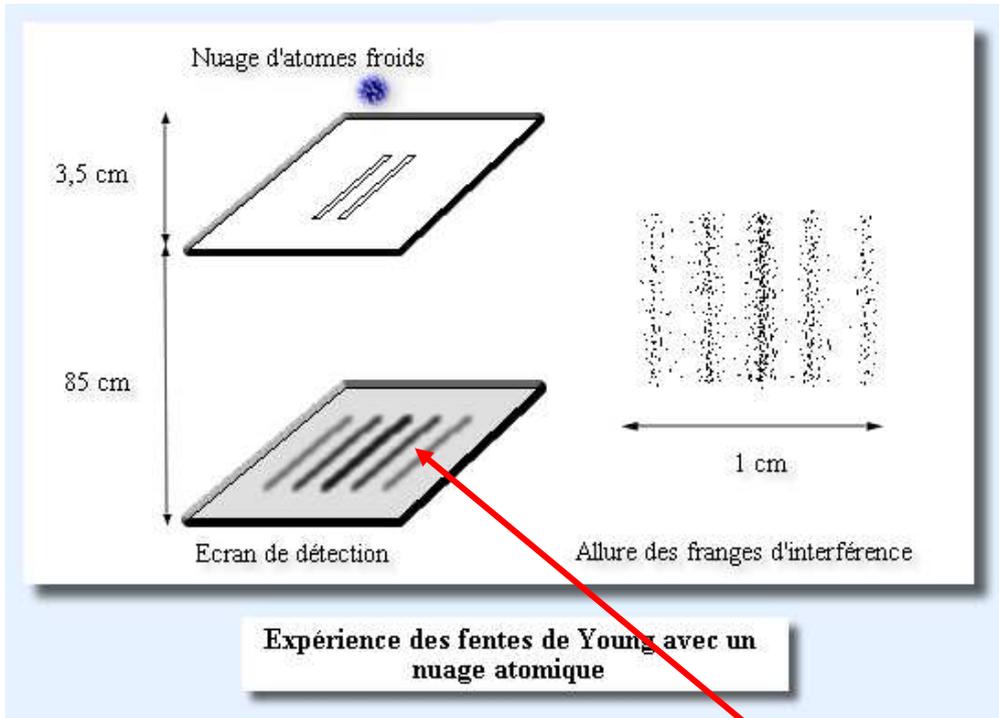
$$\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$$

formule
de De Broglie

$$\vec{k} = \vec{p} / \hbar$$

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

Même formule que pour les photons!



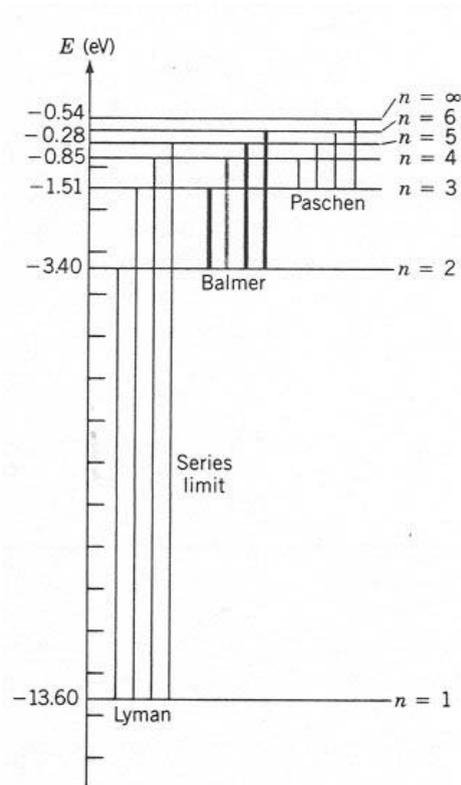
Chaque atome
 « passe par les deux trous à la fois »,
 comme une onde,
 mais se manifeste à la
 détection sous la forme
 d'un objet ponctuel

Interférence d'atomes
 en chute libre

**Matière + matière
 absence de matière !**

b) dans beaucoup de cas,
l'énergie d'un système ne varie pas de manière continue:

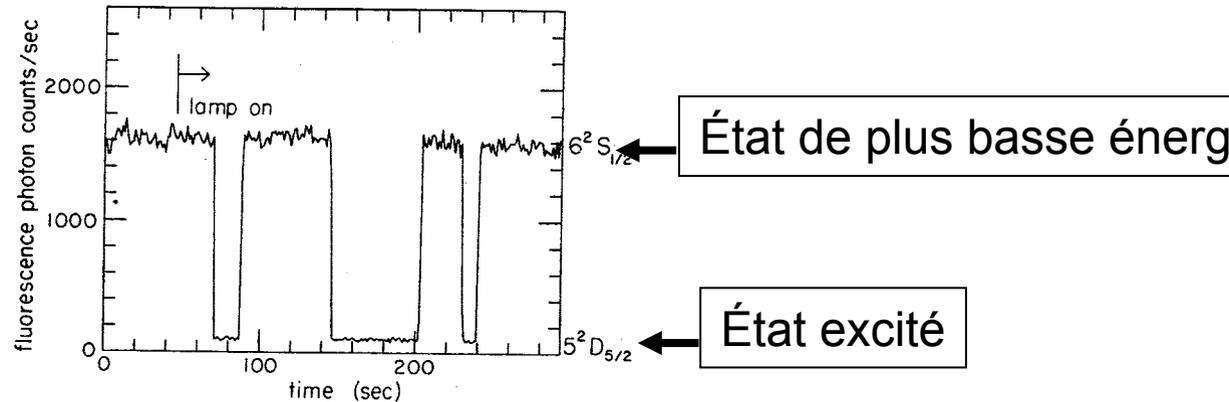
L'énergie ne prend qu'un ensemble dénombrable de valeurs



Quantification de l'énergie (exemple : atomes, molécules ...)

c) aspect probabiliste des phénomènes observés sur les particules individuelles

Mesure expérimentale de l'énergie d'un atome unique soumis à une très faible excitation lumineuse :



Le passage dans l'état excité, et le retour à l'état fondamental se font par « sauts » instantanés (**sauts quantiques**) et à des instants aléatoires et incontrôlable

Seule la **distribution statistique** de ces sauts peut être déterminée

Autre exemple : désintégration radioactive d'un noyau instable

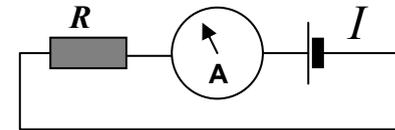
1.3.2 pour les mesures

À la différence du monde macroscopique,
on ne peut pas faire abstraction
des **processus de mesure** dans la description des phénomènes

Monde classique

L'ampèremètre modifie la valeur
de l'intensité du courant qu'il mesure,
mais d'une manière **calculable et/ou contrôlable**

$$(R_{amp} \rightarrow 0)$$



Monde quantique

lumière incidente



Éclairement minimal :
un photon



lumière diffusée par l'atome



$$\Delta E_{\min} = h\nu$$

$$\Delta \vec{p}_{\min} = \hbar \vec{k}$$

A cause de l'aspect aléatoire de l'interaction,
on ne peut pas la contrôler parfaitement
ni prédire exactement son effet :

perturbation incontrôlable de l'objet par la mesure

La description quantique des phénomènes doit englober
l'effet de l'appareil de mesure

1.4 L'échelle quantique

Quand un phénomène est-il quantique ?

Quand un phénomène est-il classique ?

L'échelle des phénomènes quantiques
est déterminée par la constante fondamentale quantique : h ou \hbar

en 2004 :

$$\hbar \approx (1,054571596 \pm 0,000000082) \times 10^{-34} \text{ S.I.}$$

Retenir : $\hbar \approx 10^{-34} \text{ SI}$ ou $h \approx 6,6 \times 10^{-34} \text{ SI}$

Dimension : $[\hbar] = [E][t]$ **Joule.seconde**

$[\hbar] = [m\vec{v}][L]$ **Kg.m².s⁻¹**

$[\hbar] = [\vec{J} = \vec{r} \times m\vec{v}]$ **Moment cinétique**

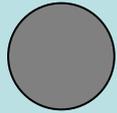
S = énergie caractéristique \times temps caractéristique

S = quantité de mouvement caractéristique \times longueur caractéristique

S = moment cinétique caractéristique

Le phénomène est essentiellement quantique si $S \leq \hbar$

Exemples



bille : 1g, 1mm

Si $v=1 \text{ mm/s}$ $S \approx 10^{-9} \text{ J.s} \gg \hbar$

Si $v=0 \text{ mm/s}$ $S = 0 \ll \hbar$

classique
quantique !!?

En fait $v_{\min} = v_{\text{thermique}} = \sqrt{k_B T / m}$

$T = 300K$ $S \approx 10^{-15} \text{ J.s} \gg \hbar$

toujours classique !

mouvement d'un atome dans une boîte : 10^{-25} Kg , 1cm

On prend la vitesse d'agitation thermique

Si $T=300K$ $S \approx 10^{-15} \gg \hbar$

classique

Si $T=10^{-8} K$ $S \approx \hbar$

quantique (atomes froids)

- **Électron dans atome** : 10^{-30} Kg, 10^{-10} m

$$v ? \quad mv^2 \approx E_{liaison} \approx 10 \text{ eV}$$

$$v \approx 10^6 \text{ m/s} \quad S \approx \hbar$$

quantique

Bohr, Schrödinger

- **Photon du rayonnement thermique**

$$E \approx k_B T \quad t_{caractéristique} = \text{période optique} \approx \lambda/c$$

$$S \approx E \times t = k_B T c / \lambda$$

$\lambda \gg 10 \mu\text{m}$ (Ondes radio, microonde ...) $S \gg \hbar$ classique

$\lambda \ll 10 \mu\text{m}$ (Ondes spectre visible, UV, X ...) $S \ll \hbar$ quantique

Premier objet du « monde quantique » découvert (1900 1905) → Planck, Einstein

1.5 objet de ce cours

Commencer par les phénomènes simples pour se forger une « intuition quantique »

1 Systèmes descriptibles par une « fonction d'onde » à une dimension
(ressemble à l'électromagnétisme)

2 Systèmes à deux états quantiques
(algèbre linéaire des matrices 2×2)

3 Règles générales et formalisme mathématique

4 Etudes des systèmes quantiques de base
(atome, oscillateur harmonique, moment cinétique ...)

5 Systèmes formés de plusieurs particules : corrélations quantiques
(un des aspects les plus étranges du monde quantique)