

# Dualité onde-corpuscule

**David Guéry-Odelin**

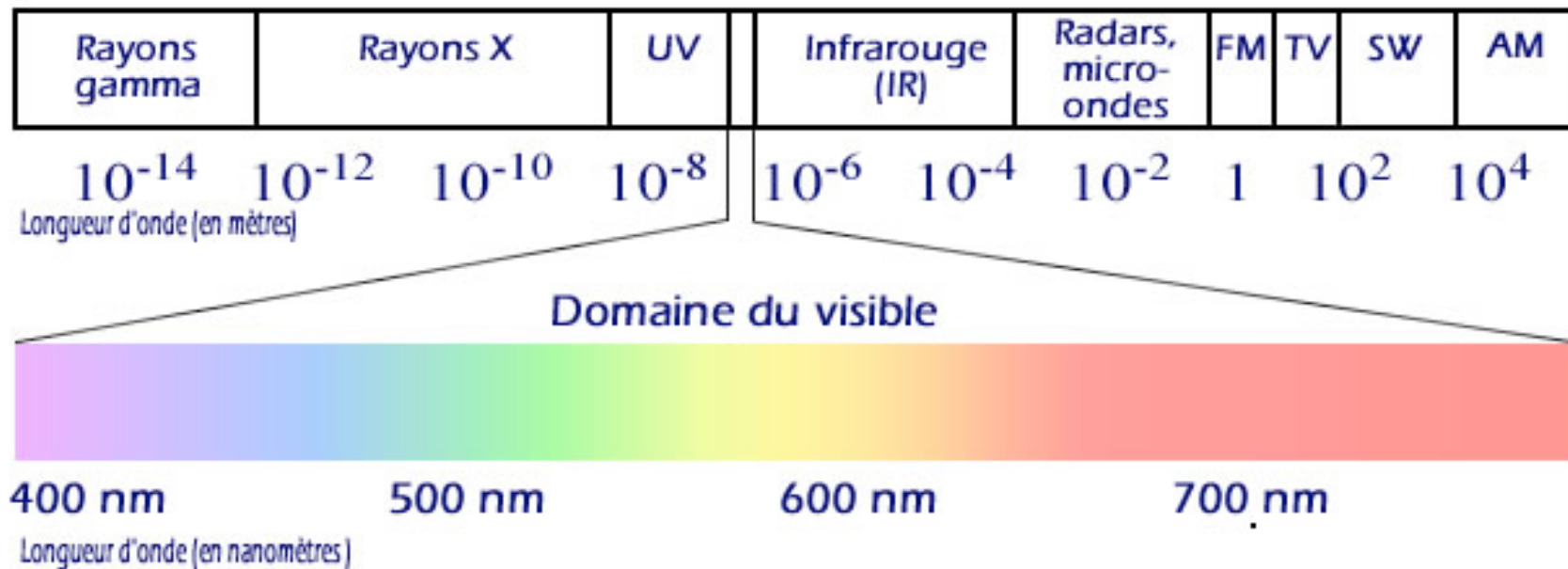
Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité  
Université Paul Sabatier, Toulouse



midipyrenees.fr



# Les ondes électromagnétiques



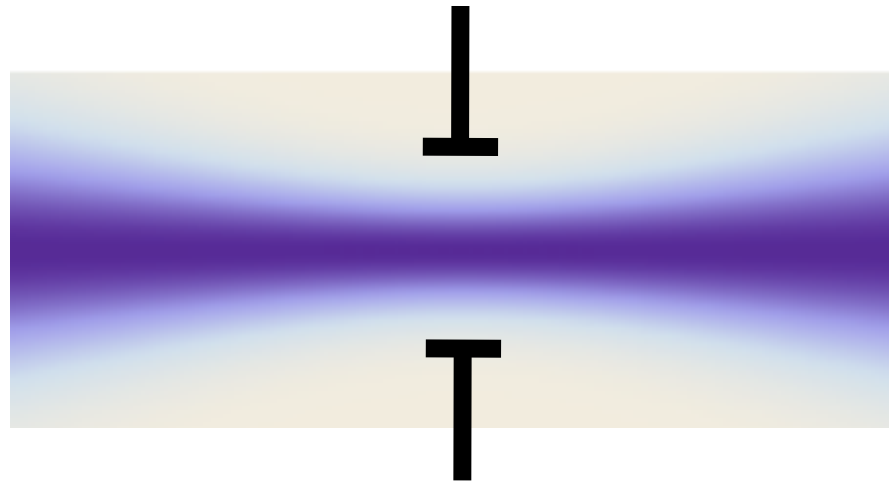
Fréquence  $\nu$  (ne dépend pas du milieu)

Longueur d'onde  $\lambda$  (qui dépend du milieu)

# **Quelques comportements ondulatoires**

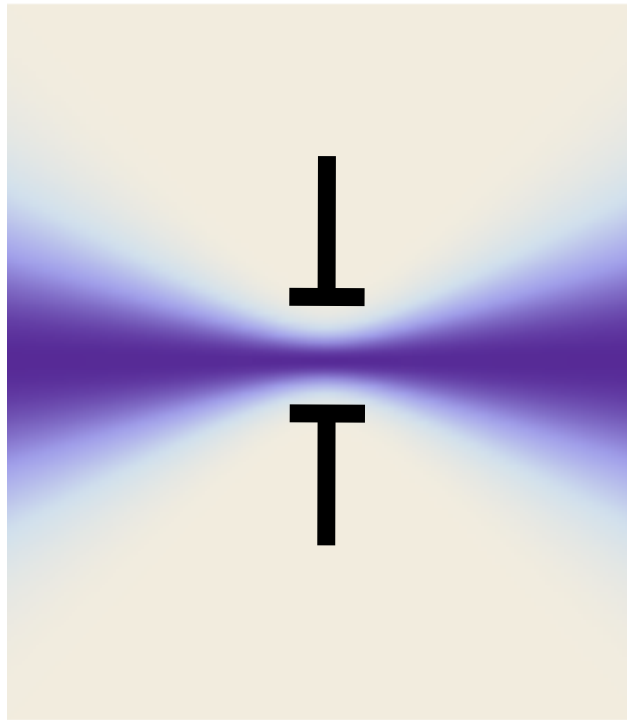
# Comportement diffractif de la lumière

---



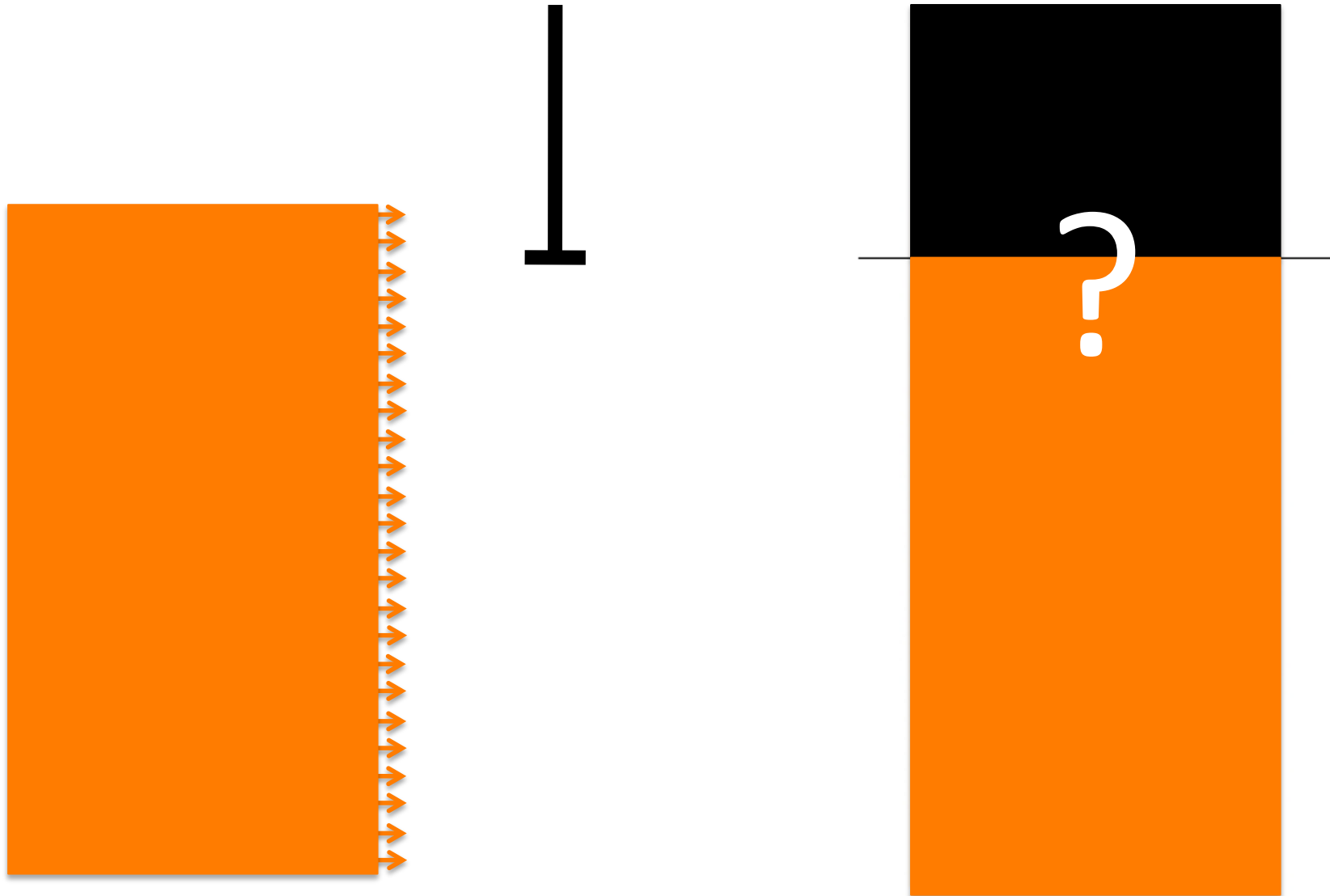
# Comportement diffractif de la lumière

---



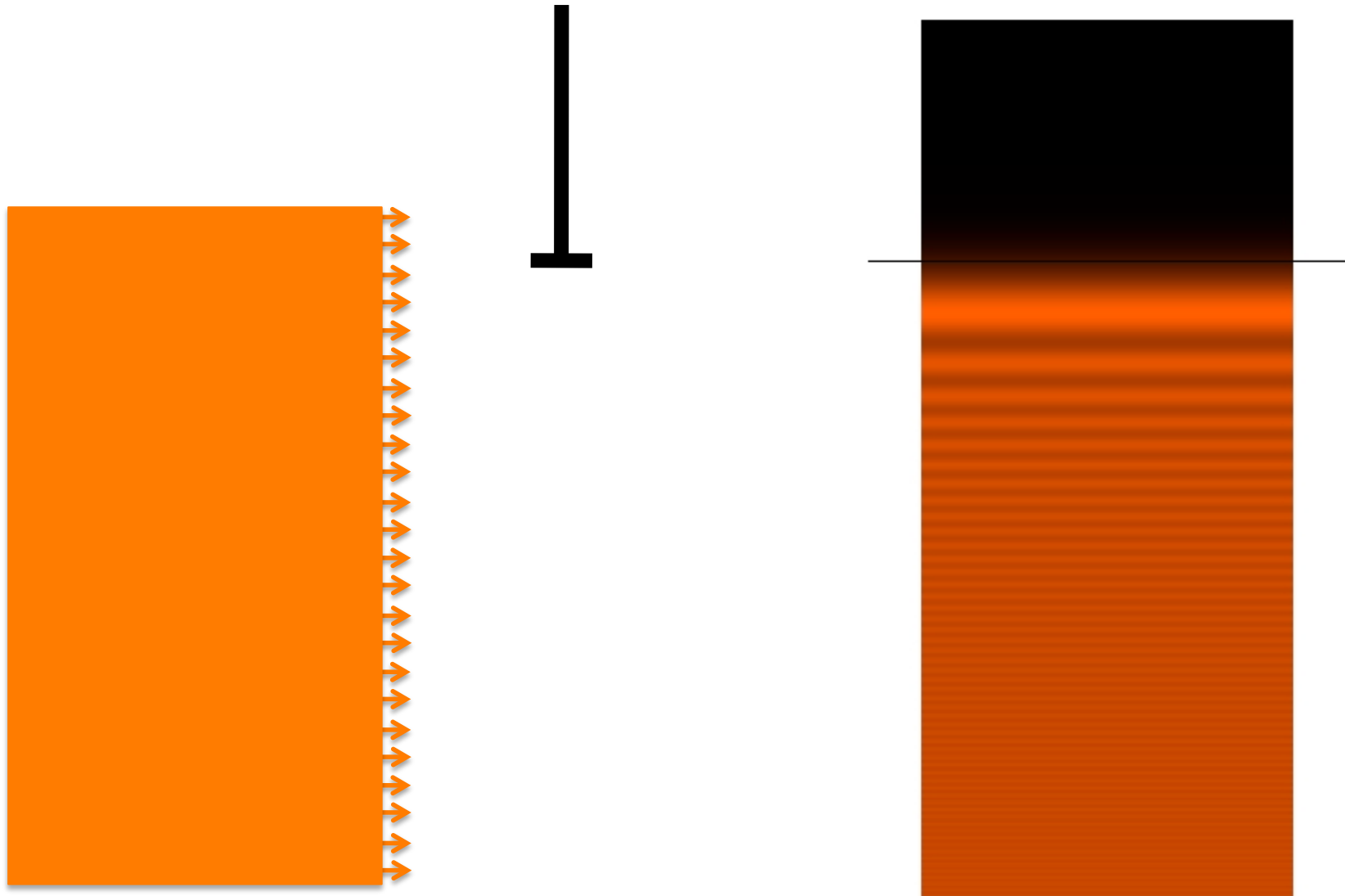
# Diffraction par un bord d'écran

---



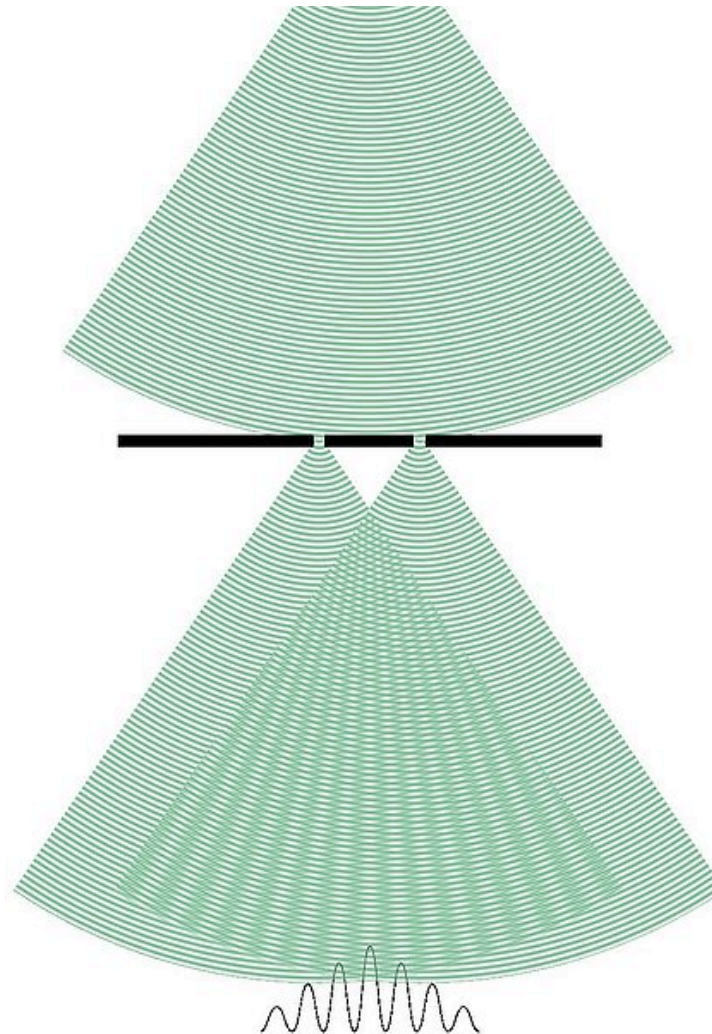
# Diffraction par un bord d'écran

---



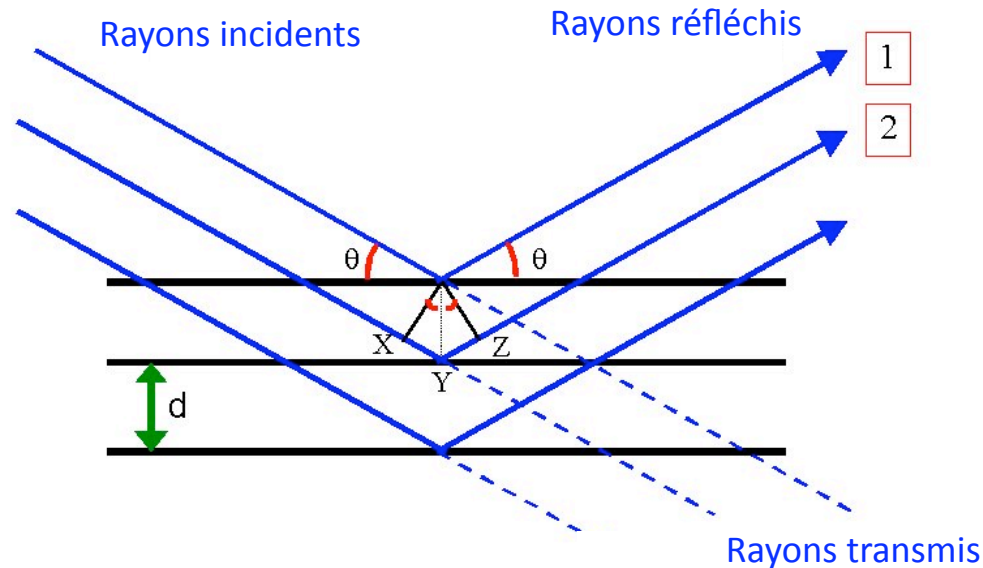
# La fameuse expérience des fentes d'Young

---





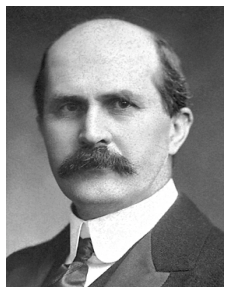
# La diffraction de Bragg (1913)



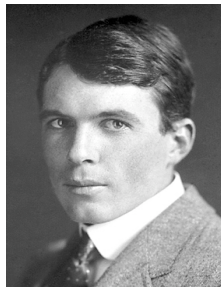
Découverte des rayons X  
W. C. Röntgen  
Prix Nobel de physique 1901

Lorsque la différence de parcours entre les ondes réfléchies par deux plans adjacents est un multiple de la longueur d'onde incidente, il y a un maximum de diffraction

$$2d \sin \theta = n \lambda$$



W. H. Bragg

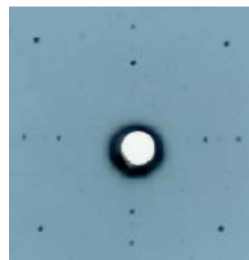


W. L. Bragg

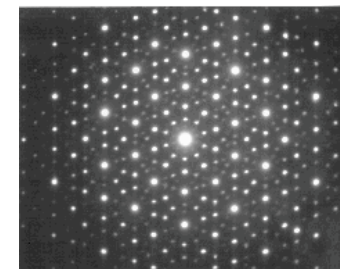


Prix Nobel de physique 1915

Sonder la structure de la matière  
grâce aux rayons X

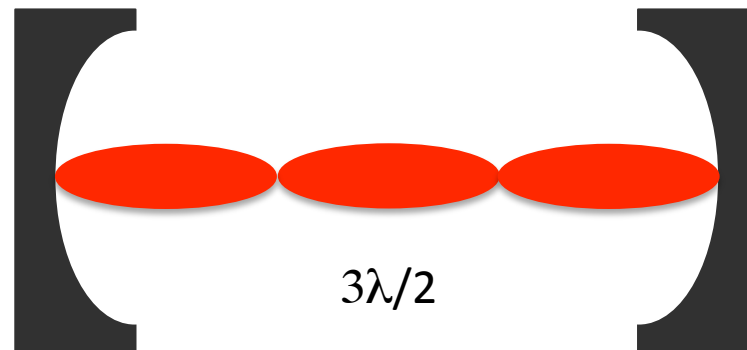
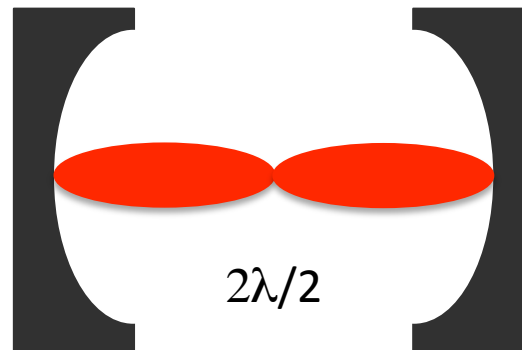
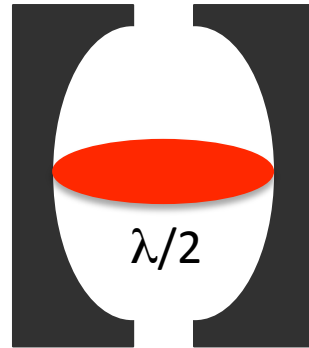


Si



# Les modes longitudinaux d'une cavité

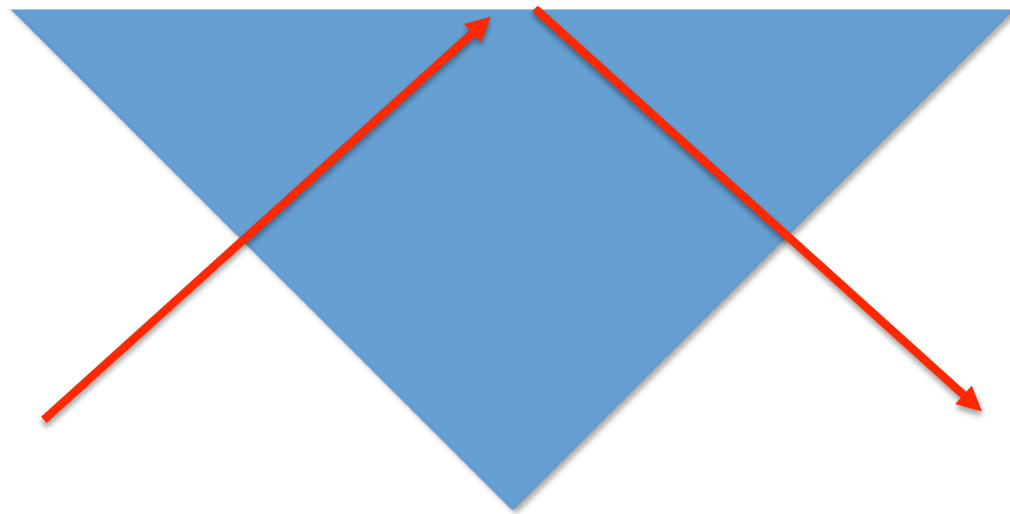
---



# Réflexion totale

---

Le point de vue de l'optique géométrique  
(description en termes de rayons)



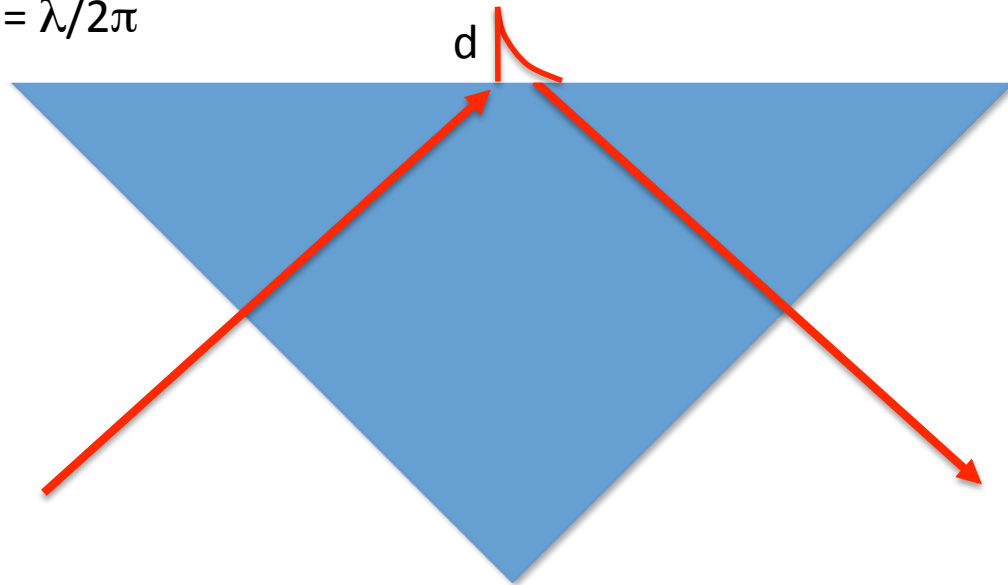
# Les ondes évanescentes

---

L'optique géométrique est une approximation  
de la description ondulatoire

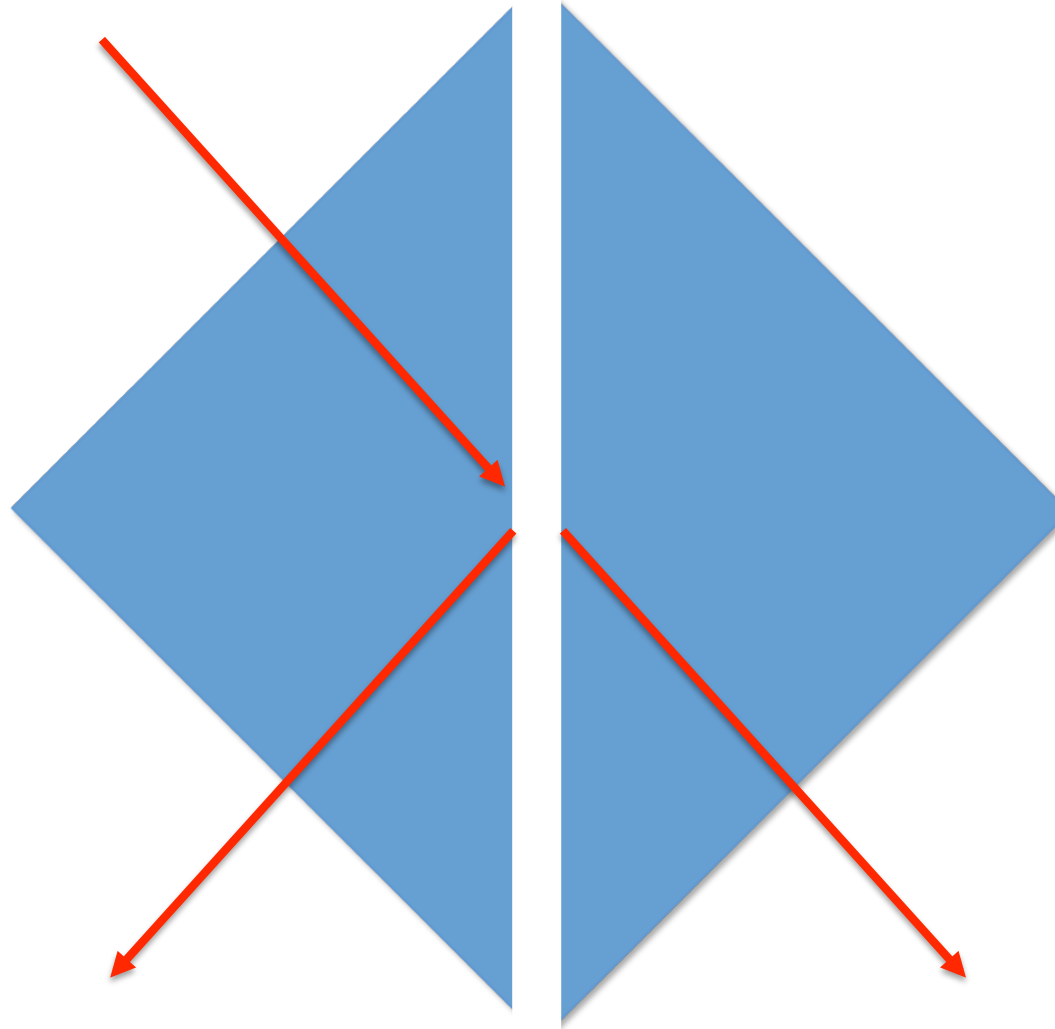
La description ondulatoire fait apparaître un nouveau phénomène  
L'existence d'une **onde évanescente**

Taille typique =  $d = \lambda/2\pi$



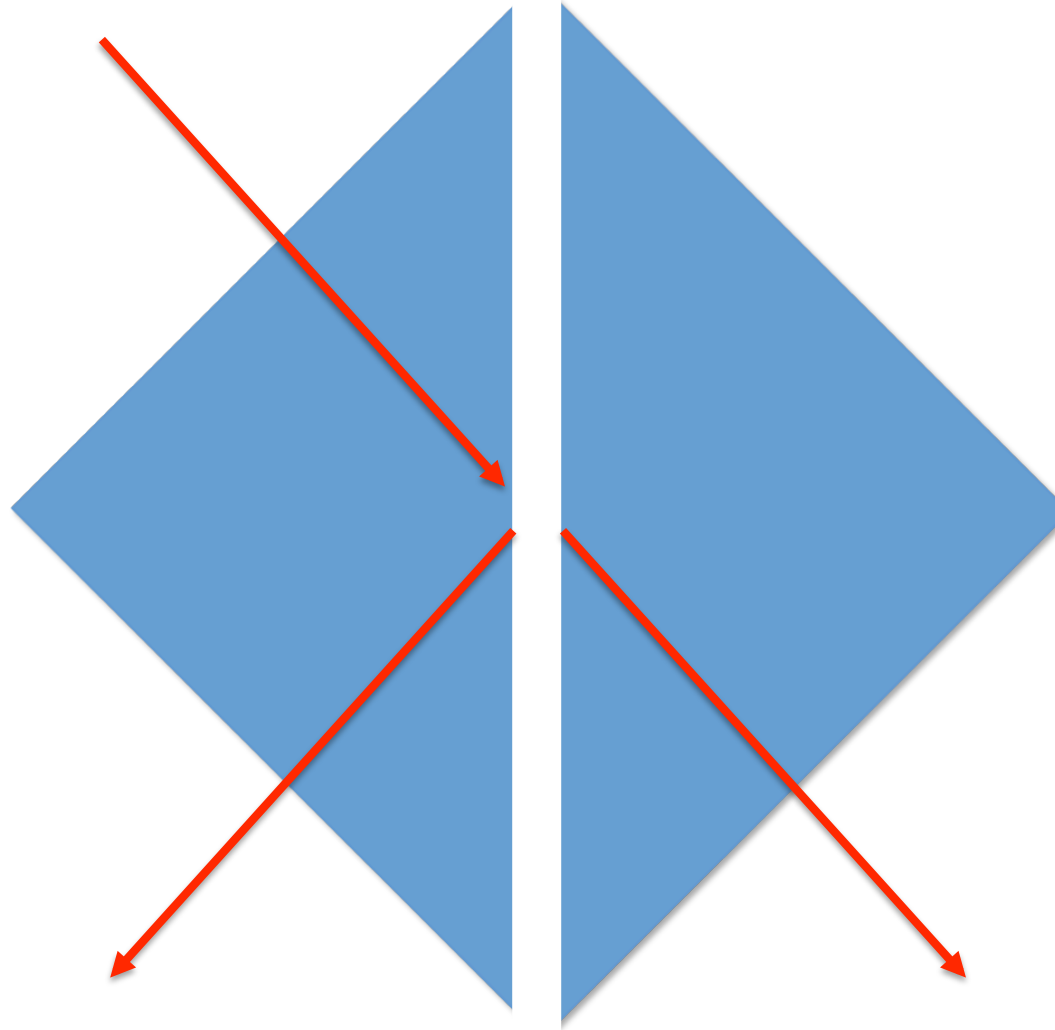
# L'effet tunnel avec des ondes électromagnétiques

---



# L'effet tunnel avec des ondes électromagnétiques

---

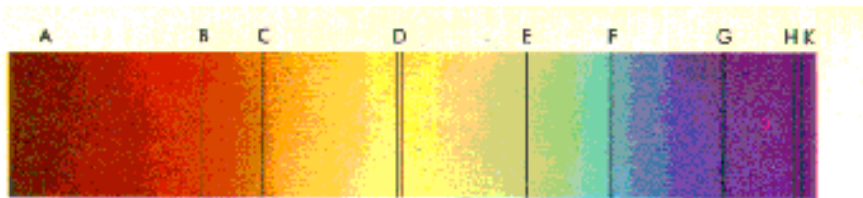


L'effet tunnel est un effet ondulatoire  
**Grande sensibilité à la distance de séparation**

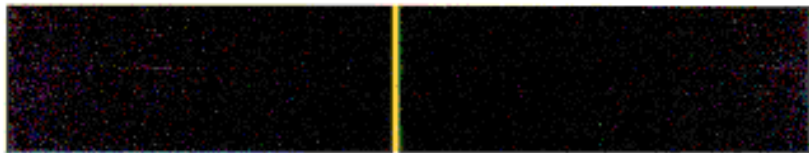
# Interaction d'un atome avec la lumière

# Les couleurs émises : une source d'information

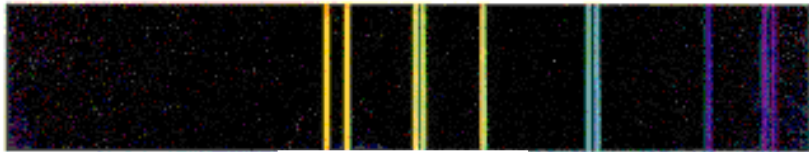
L'histoire de la mécanique quantique tire en partie son origine des études spectrales faites au XVIII et XIX ième siècle



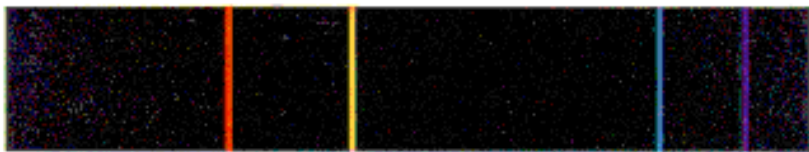
Spectre du soleil



Sodium



Mercure

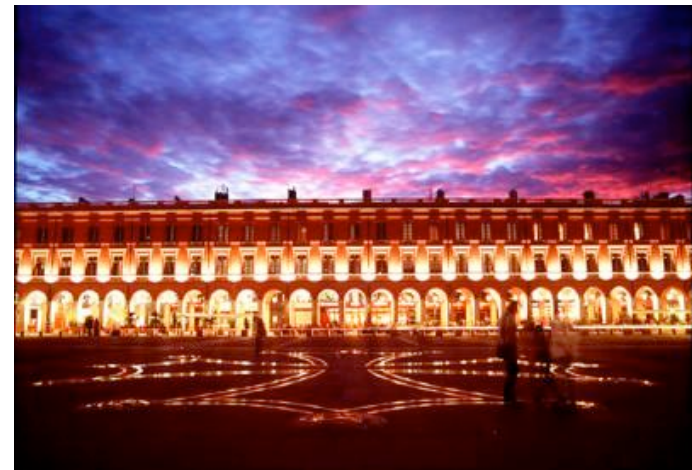


Lithium



Hydrogène

**Ex : lampes au sodium**  
(éclairage orangé des  
lampes de ville)

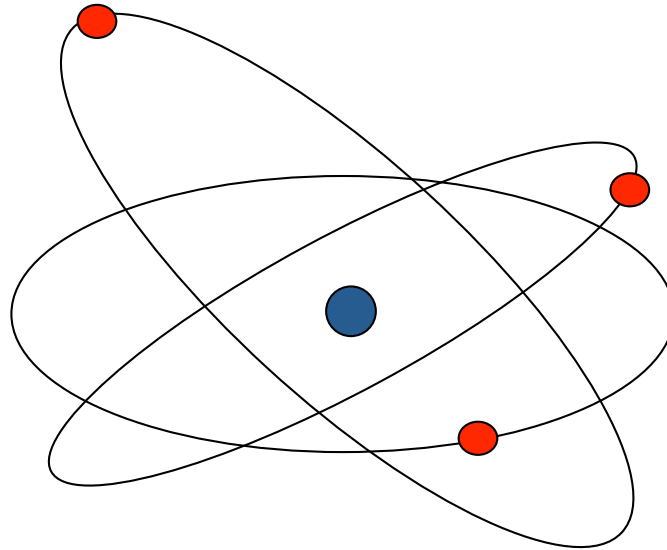




# La conception de l'atome après les expériences de Rutherford

---

Bohr souligne le problème de l'instabilité du modèle planétaire proposé par Rutherford

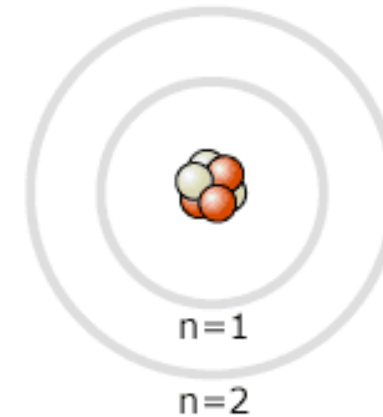


Instabilité dynamique car les électrons se repoussent

# Le modèle de Niels Bohr (1913)

---

Il n'existe que des orbites discrètes  
(notion d'état stationnaire)

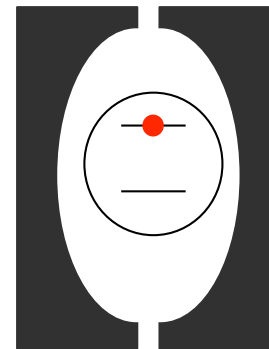
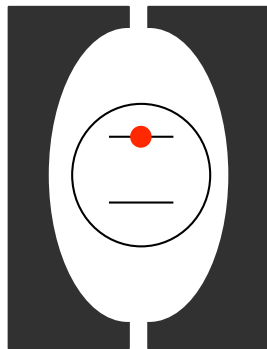
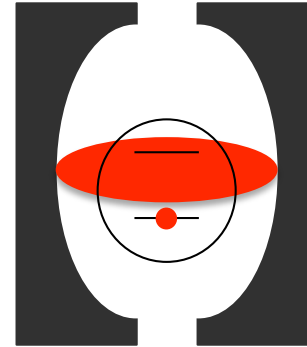
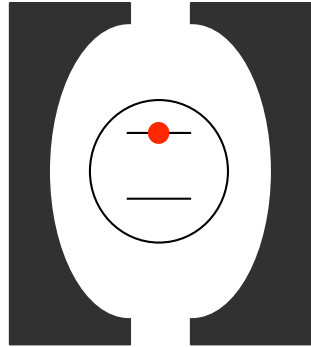


Le passage d'une orbite à une autre se fait  
grâce à l'émission ou l'absorption d'un grain de  
lumière, le **photon**

La théorie de Bohr propose une image  
simple et convaincante des données spectrales

# Inhibition de l'émission spontanée

---



D. Kleppner and S. Haroche, Physics Today **42**, (1)24 (1989)

**Louis de Broglie**

**Associer une onde à une particule**

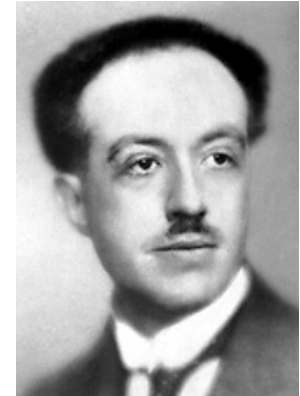
# Einstein : « Il a soulevé une partie du voile »

Particule matérielle : Energie  $E$  et impulsion  $p$

Onde : fréquence  $\nu$  et longueur d'onde  $\lambda$

Dualité  
onde-corpuscule

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$



Louis de Broglie

Exemple lumière : longueur d'onde  $\lambda$  (couleur) et corpuscule = photons

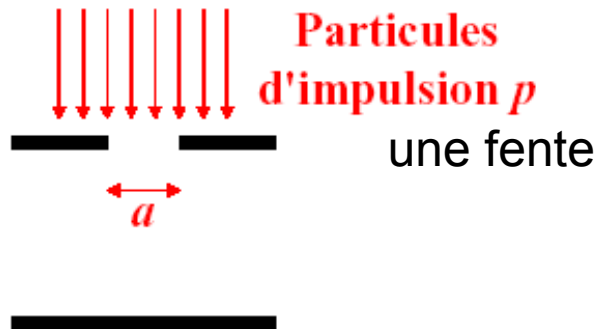
Pour une particule matérielle

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p} \underset{v \ll c}{\simeq} \frac{h}{mv}$$



Prix Nobel de physique 1929

# Ordres de grandeur



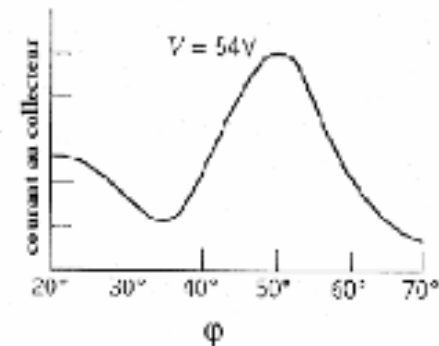
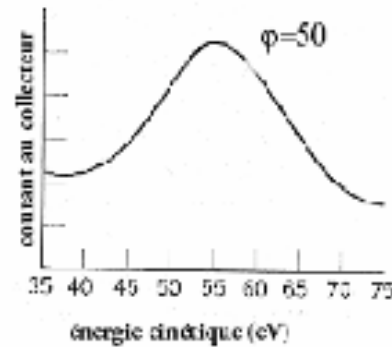
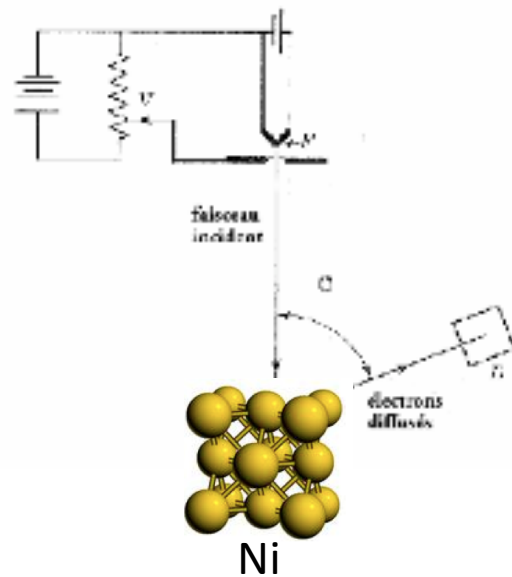
Les phénomènes non classiques  
dominent quand

$$\lambda > a \quad \Longleftrightarrow \quad p a < h \quad \text{"action"}$$

Ordres de grandeur ( $h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ )

Système considéré	Masse (kg)	Vitesse (m/s)	Taille de l'ouverture (m)	$p a / h$
Homme passant une porte	70	1	1	$10^{34}$
Globule rouge dans un capillaire	$10^{-16}$	$10^{-1}$	$10^{-4}$	$10^{11}$
Electron à travers une fente	$9 \cdot 10^{-31}$	700	$10^{-6}$	1

# L'expérience de Davisson et Germer (1927)



**C'est une expérience de diffraction de Bragg avec des ondes électroniques**

Lorsque l'énergie est fixée on observe un maximum de diffraction à un certain angle

Lorsque l'angle de diffraction est fixé, on observe un maximum de diffraction pour une certaine énergie des électrons incidents

# Diffraction des électrons

---



Clint Davisson (1881-1958)  
Lester Germer (1896-1971)



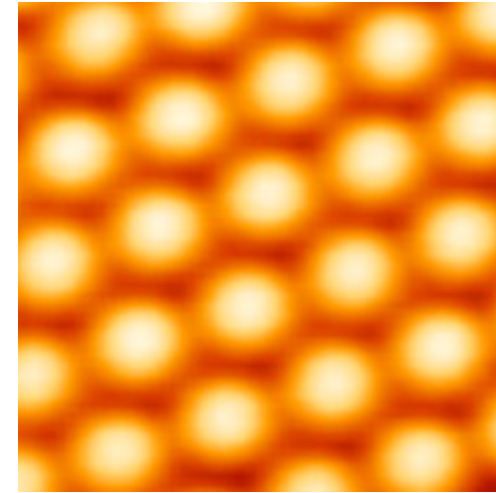
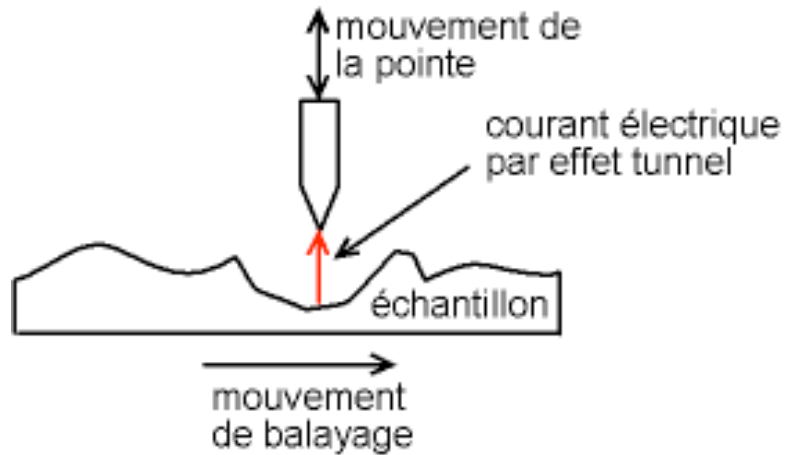
George Paget Thomson (1892-1975)



Prix Nobel de Physique 1937



# Microscopie à effet tunnel



Atomes de silicium à la surface d'un cristal de carbure de silicium (SiC)

Prix Nobel de Physique 1986



E. Ruska



G. Binnig



H. Rohrer

to Ernst Ruska *"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"*, the other half jointly to Gerd Binnig and Heinrich Rohrer *"for their design of the scanning tunneling microscope"*.

# Diffraction d'un objet composite : l'hélium

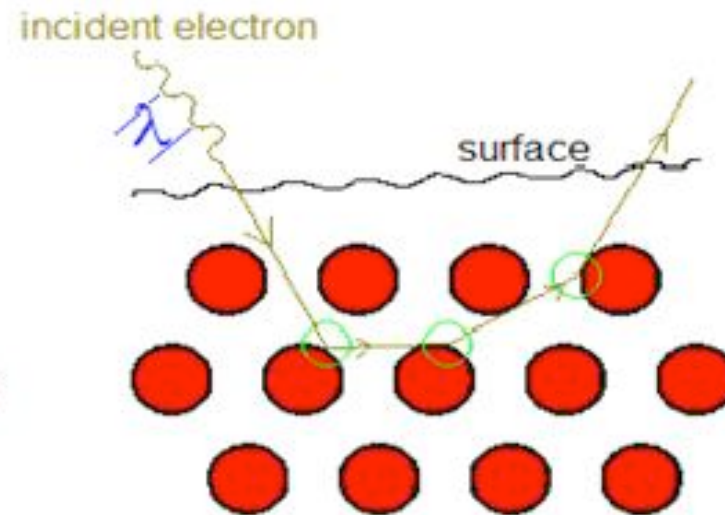
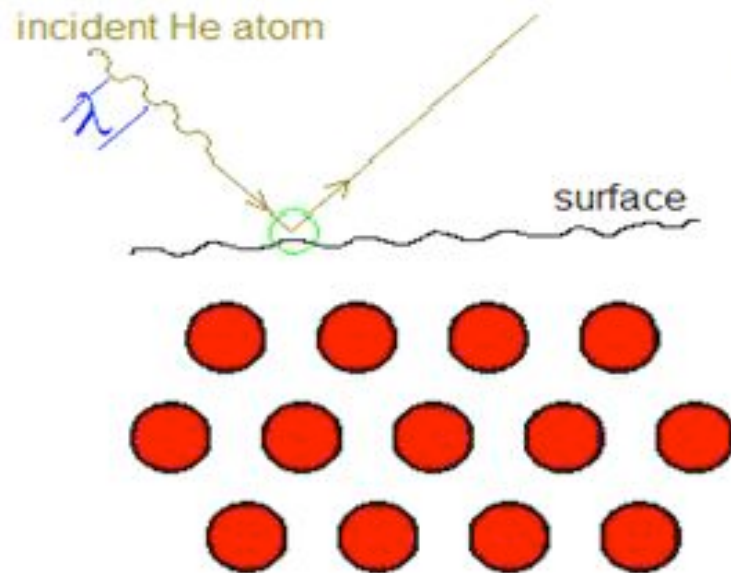
L'expérience d'Estermann et Stern 1932



I. Estermann



O. Stern



Les atomes d'Hélium sondent la structure périodique de la surface

# Les lois de la mécanique quantique

---

Description **complète** par une fonction d'onde  $\Psi(x,t)$

Evolution **déterministe** de la fonction d'onde

Equation de Schrödinger (1925)

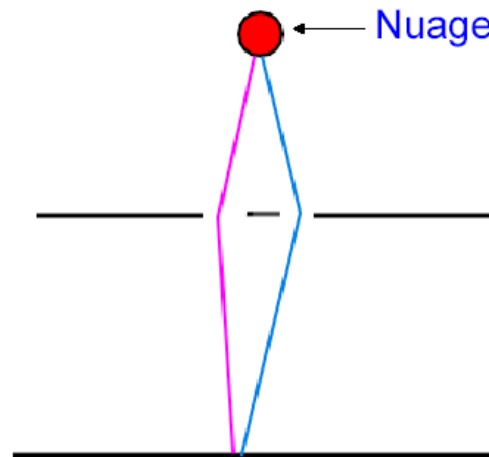


**Mesure** : postulat de Max Born (1926)



$|\Psi(x,t)|^2$  représente la probabilité de trouver la particule en  $x$  à l'instant  $t$

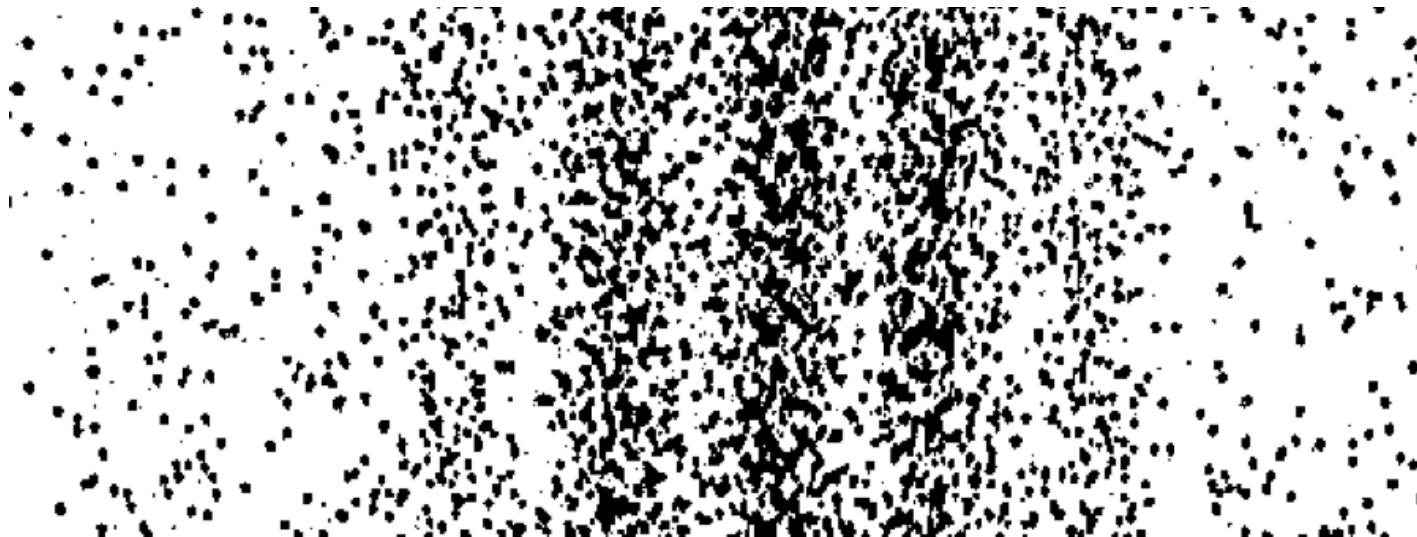
# L'expérience des fentes d'Young avec des atomes de néon



1992 : Expérience  
de démonstration  
atomes de néon  
(Prof. Shimizu, Tokyo)

Des atomes préparés  
dans *les mêmes conditions*  
donnent des impacts en  
des positions différentes !

Les atomes sont dans une superposition d'états des  
deux chemins possibles



La **répétition** de la mesure permet de reconstituer  $|\Psi(x,t)|^2$  qui exhibe un caractère ondulatoire

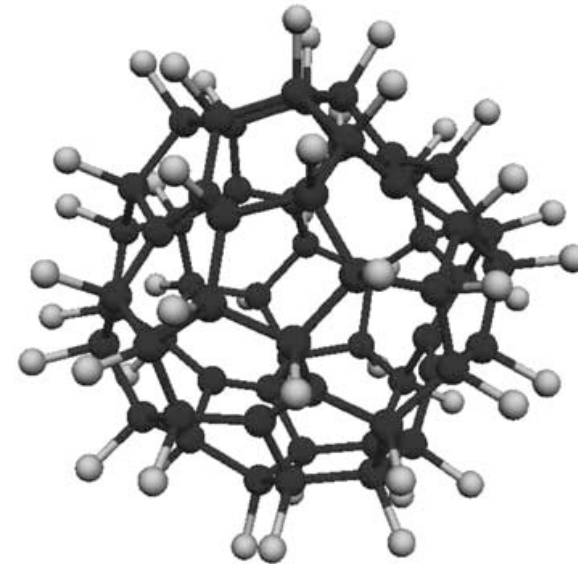
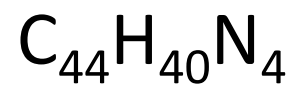
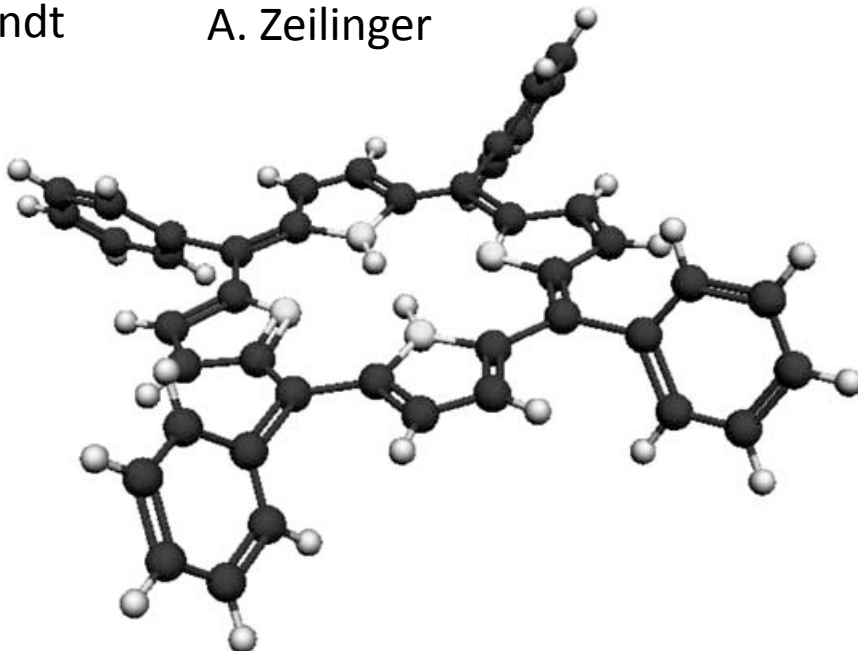
# Diffraction de grosses molécules



M. Arndt



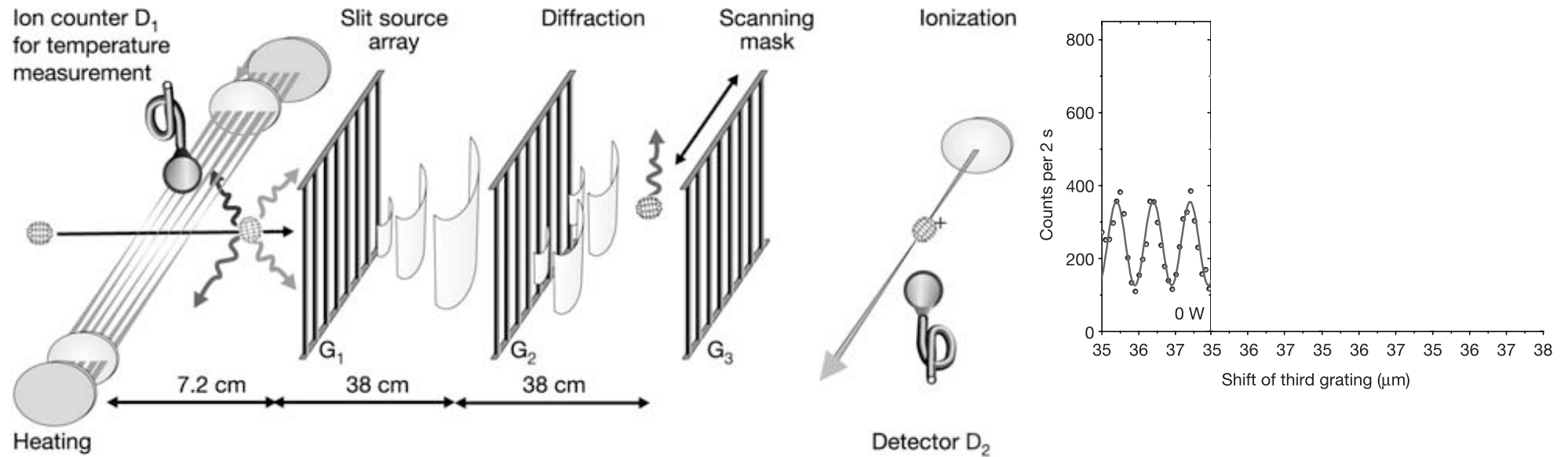
A. Zeilinger



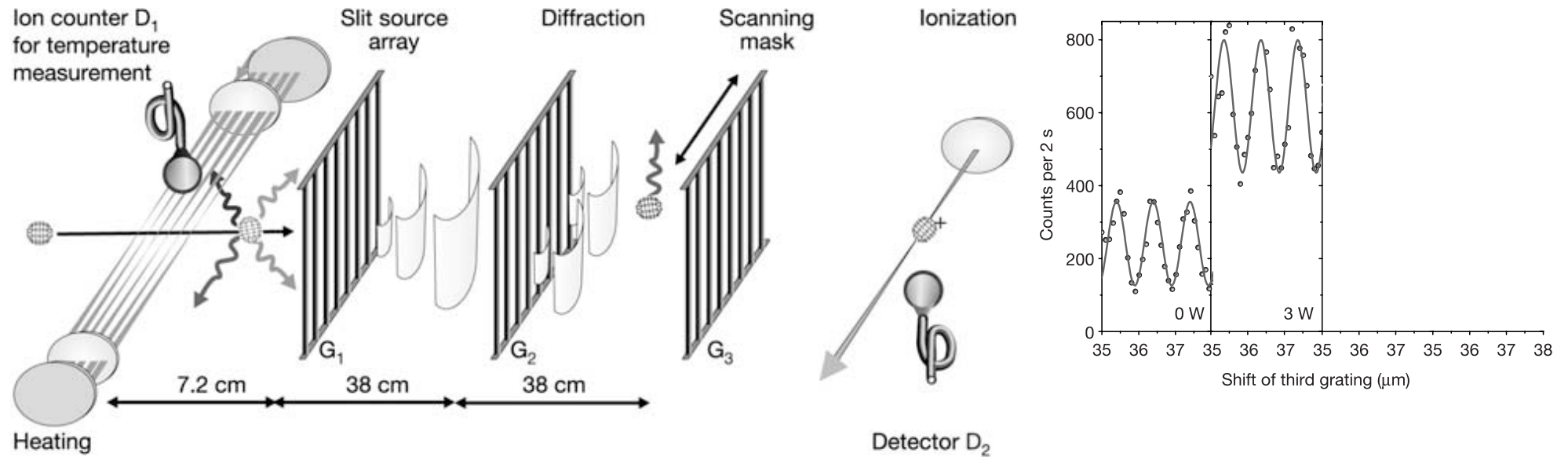
M. Arndt *et al.* Nature **401**, 680 (1999).

L. Hackermüller *et al.* Physical Review Letters (2003).

# Décohérence : vers le monde macroscopique

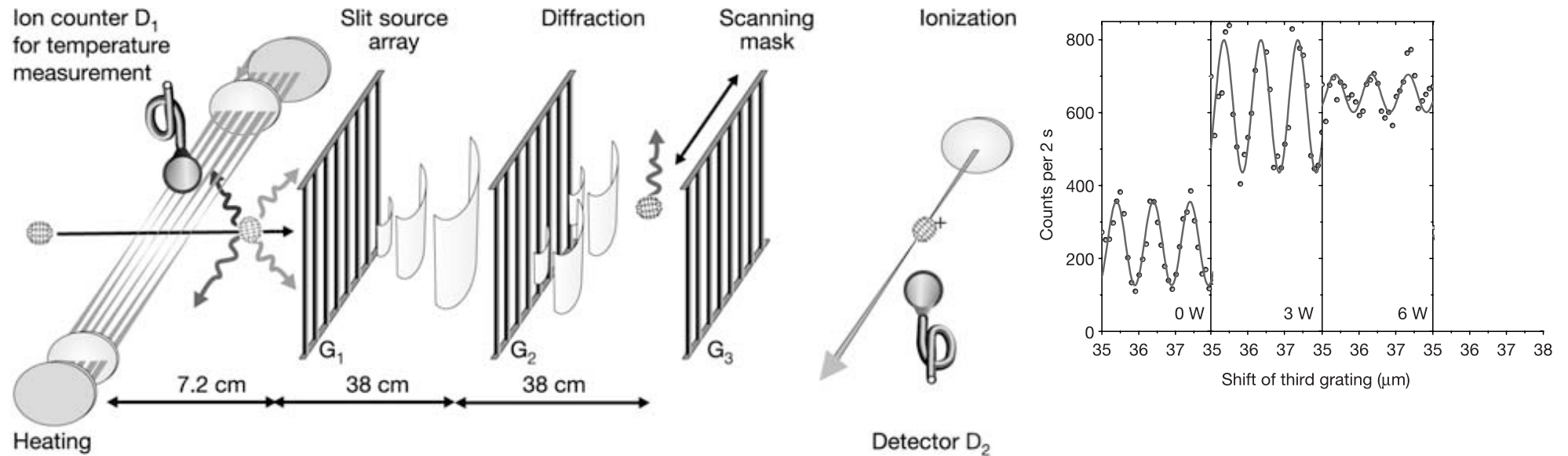


# Décohérence : vers le monde macroscopique





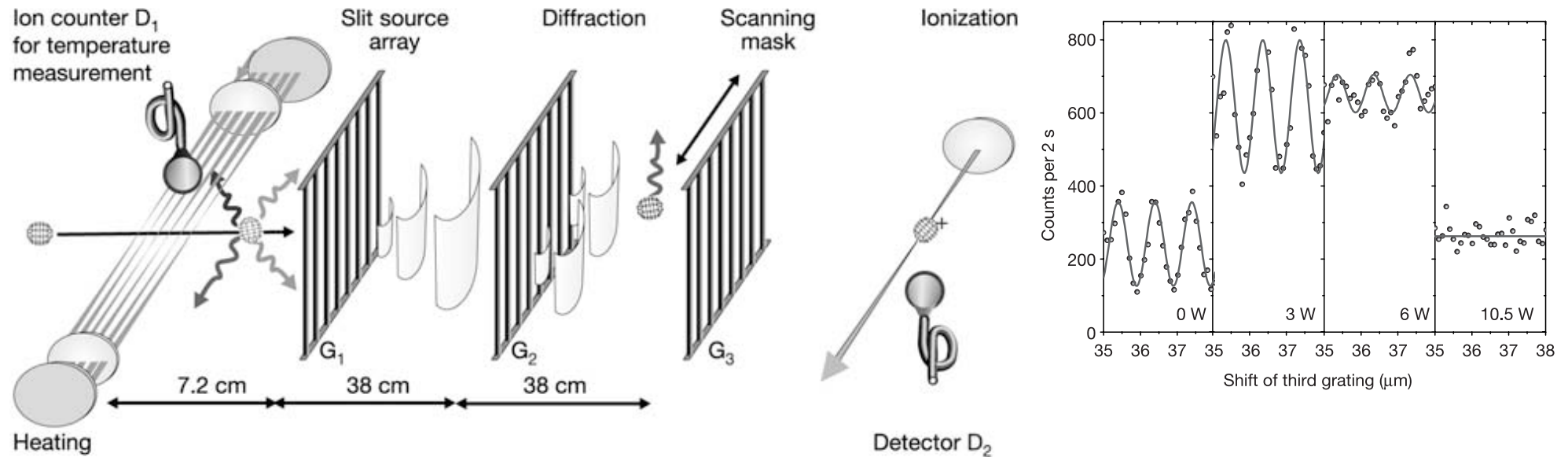
# Décohérence : vers le monde macroscopique



La possibilité de localiser le chemin suivi par le biais des photons émis supprime le caractère ondulatoire de la distribution des atomes sur l'écran



# Décohérence : vers le monde macroscopique

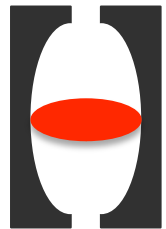
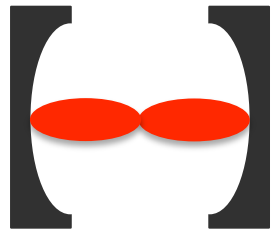
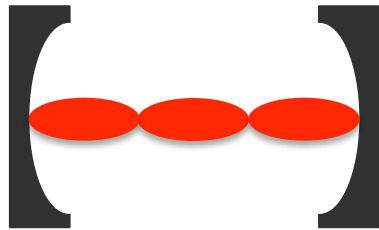


La possibilité de localiser le chemin suivi par le biais des photons émis supprime le caractère ondulatoire de la distribution des atomes sur l'écran

**Spectre d'émission atomique :  
un révélateur de la nature  
ondulatoire des électrons**

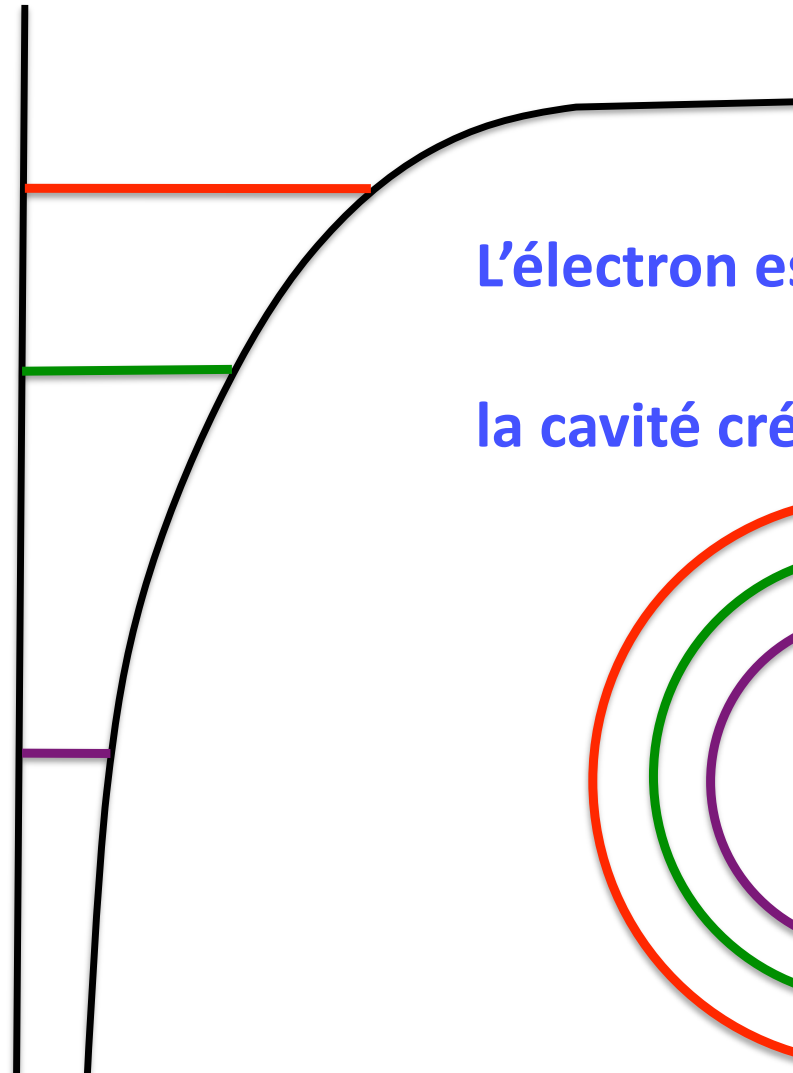
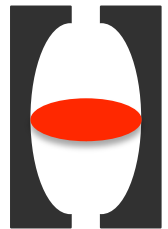
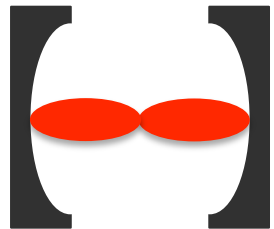
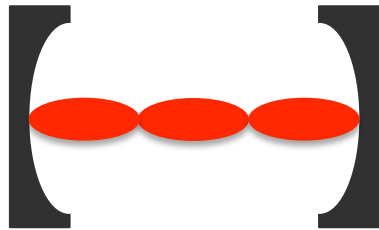
# Interprétation ondulatoire des orbites de Bohr (1913)

---

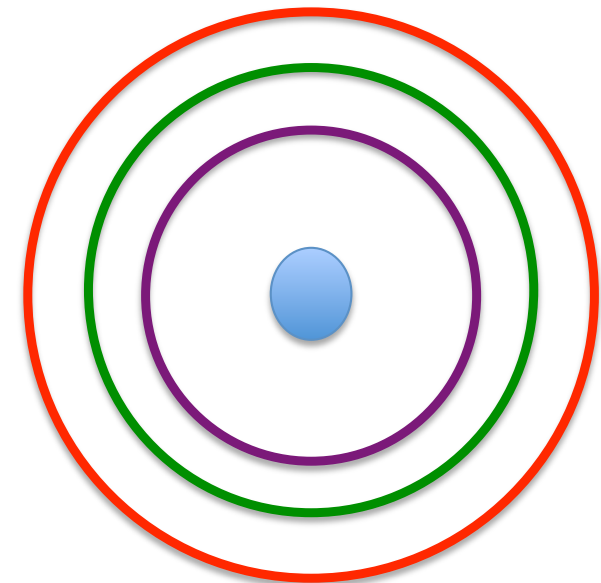


# Interprétation ondulatoire des orbites de Bohr (1913)

---



L'électron est une onde dans  
la cavité créée par le proton

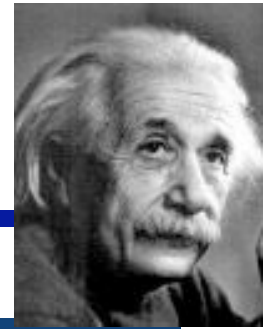


Atome de Bohr

**Un gaz entier peut-il avoir un  
comportement ondulatoire ?**



# La prévision étonnante d' A. Einstein Inspirée par les travaux de S. Bose



Dans un gaz il y a deux échelles de longueur :

la distance entre particules  $d$

la longueur d'onde de de Broglie  $\lambda$

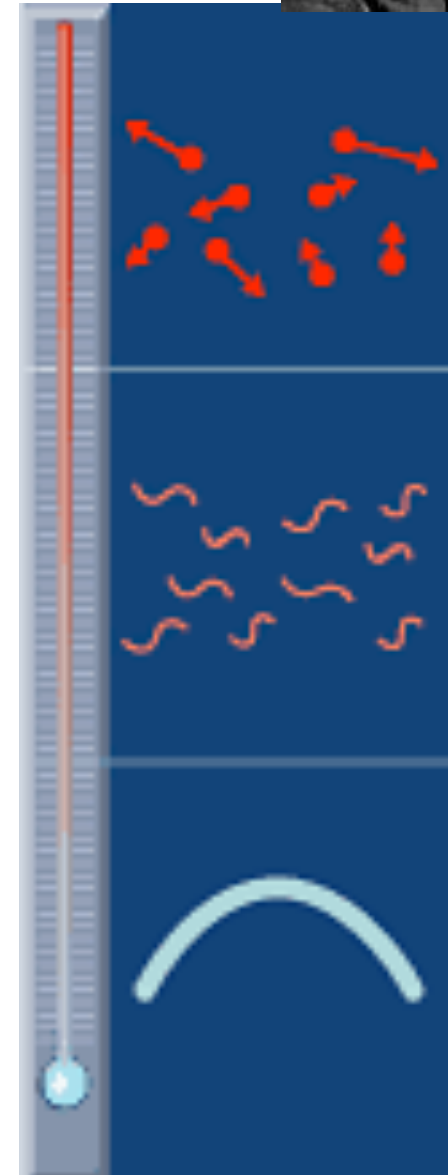
A température ordinaire :  $\lambda \ll d$  i.e. comportement  
« corpusculaire ».

Si  $T$  diminue,  $\lambda$  augmente

Einstein (1924) prévoit une transition de phase :  
condensation de Bose Einstein quand  $\lambda = d$

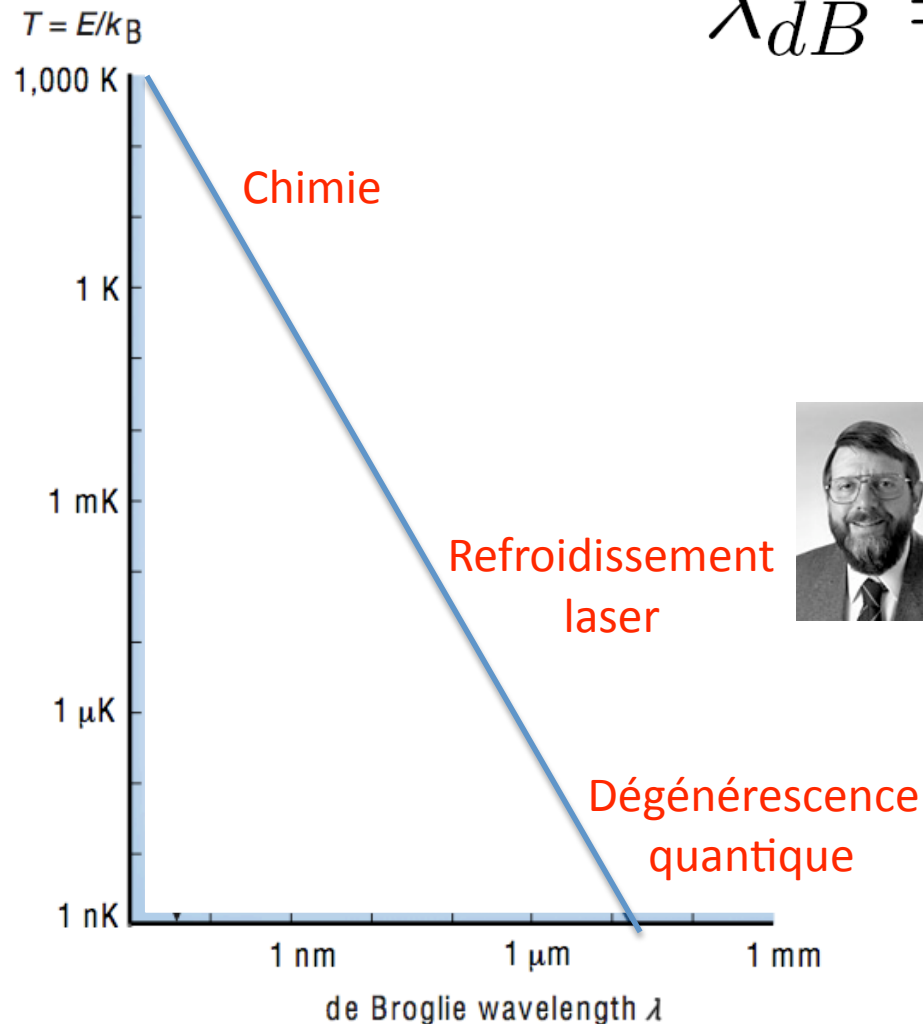
Einstein à Ehrenfest:

*"C'est une belle théorie, mais contient-elle une vérité ?"*



# Basses températures et grande longueur d'onde de de Broglie

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$



Prix Nobel de physique 1997

W. Phillips, S. Chu, C. Cohen-Tannoudji

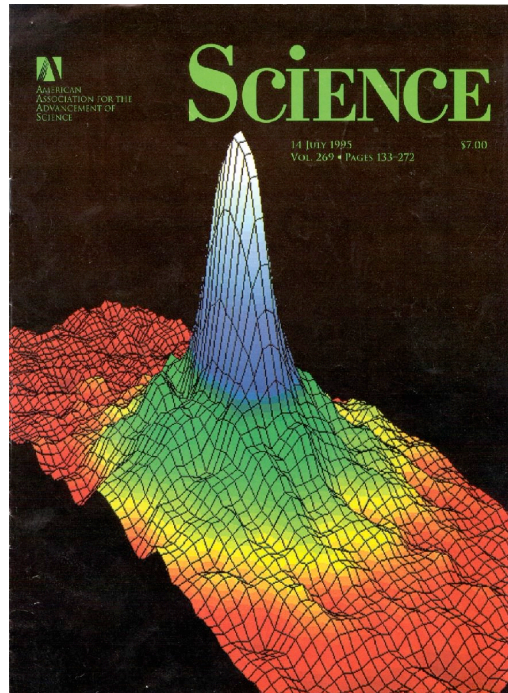


Prix Nobel de physique 2001

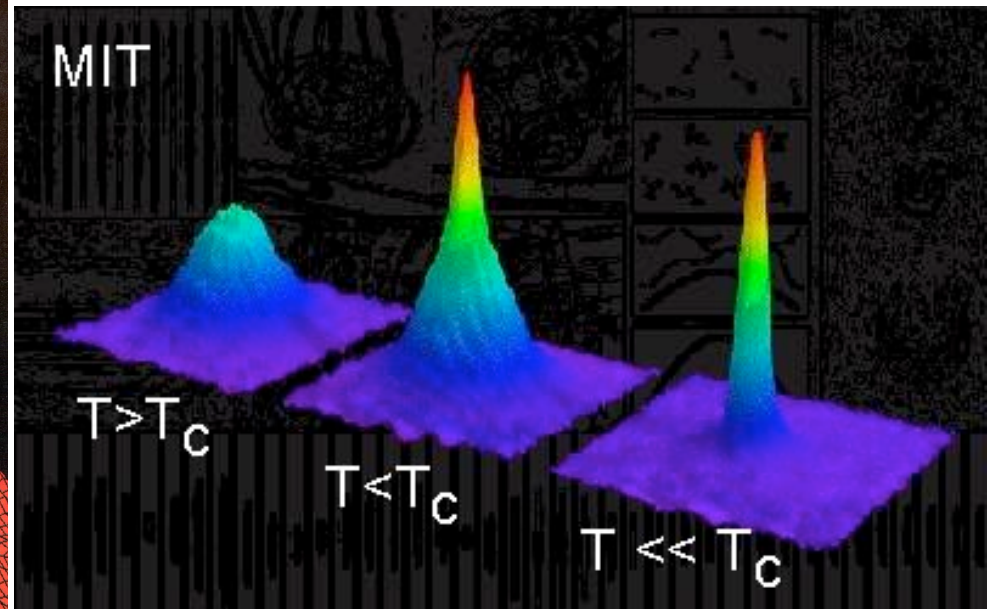
E. Cornell, C. Wieman, W. Ketterle

# Condensation de Bose-Einstein

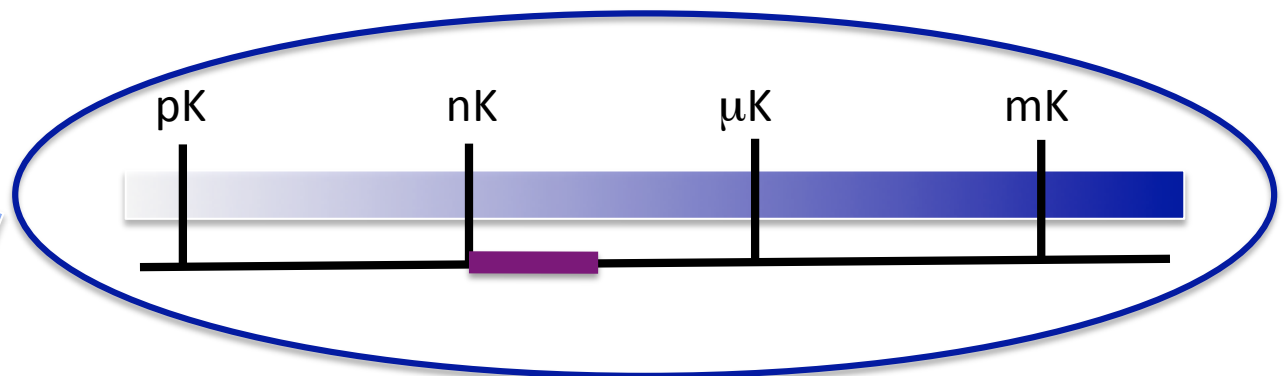
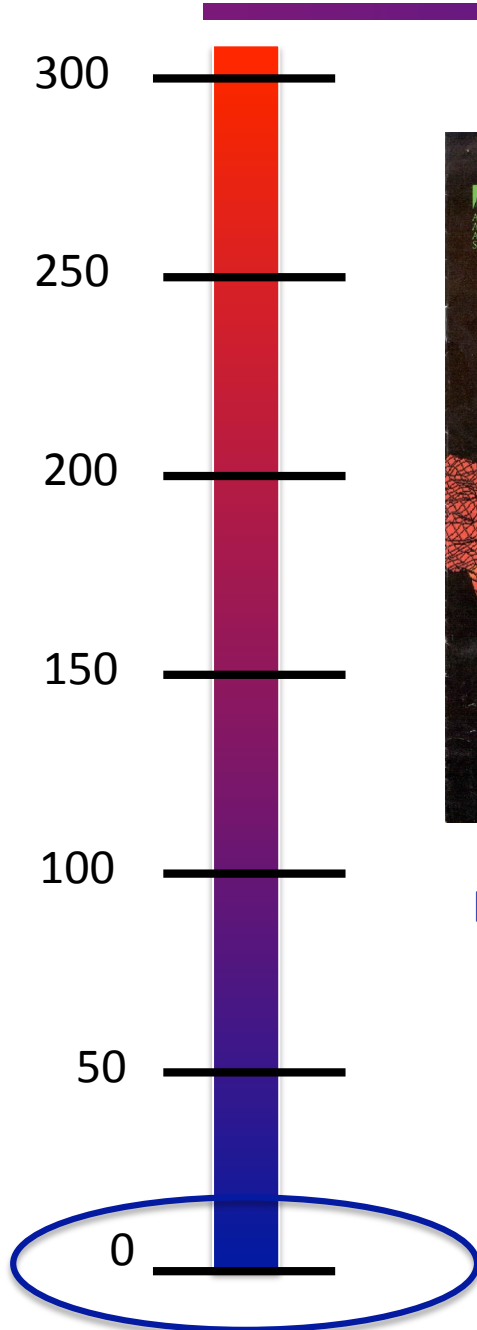
Taille  $\sim 100 \mu\text{m}$  !    Température de condensation 200 nK



Boulder, Colorado  
E. Cornell et C. Wieman



MIT  
W. Ketterle





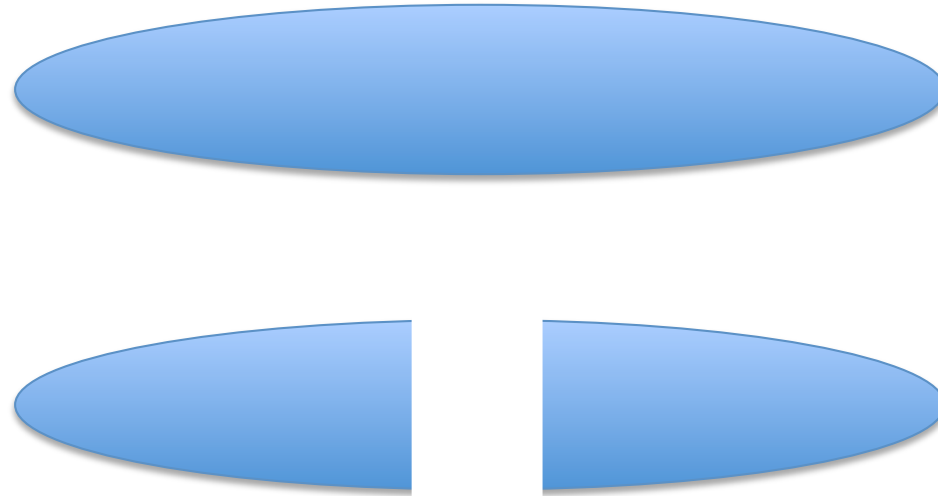
# Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques

---



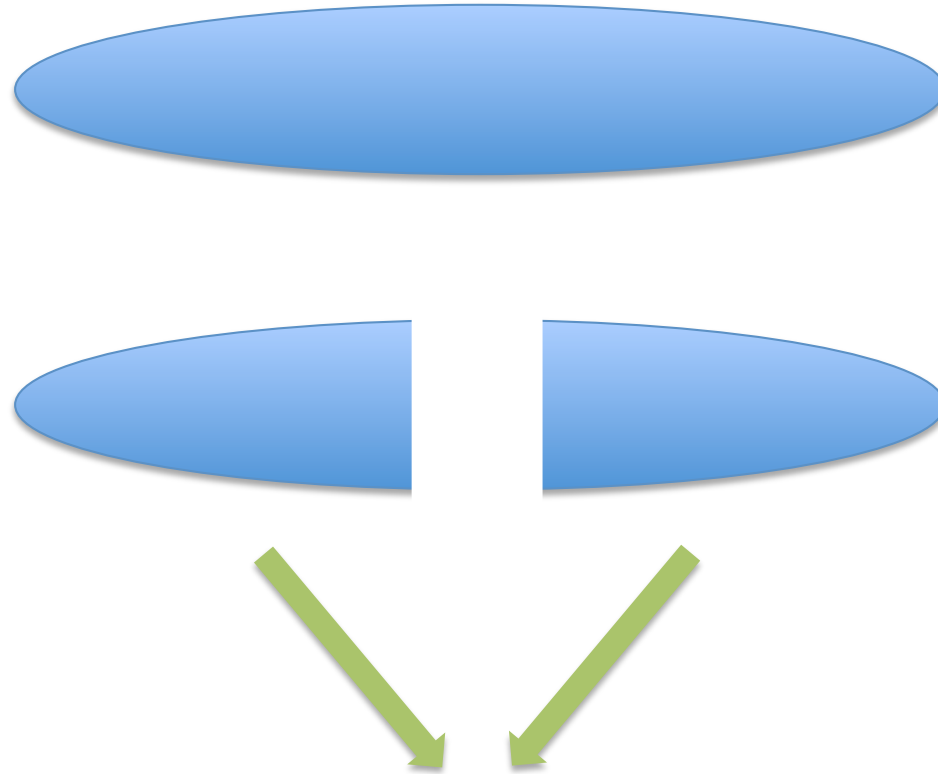
# Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques

---



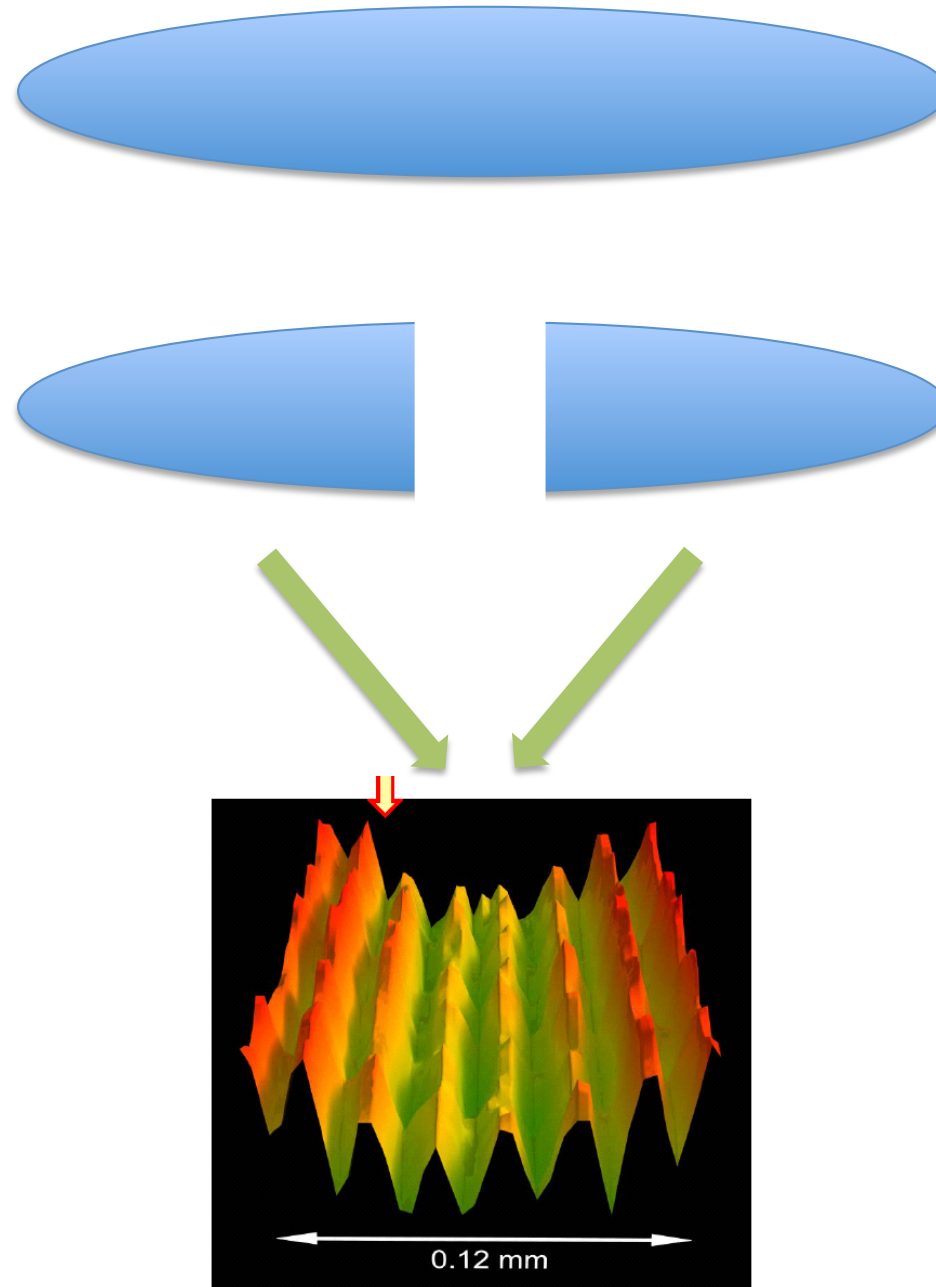
# Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques

---

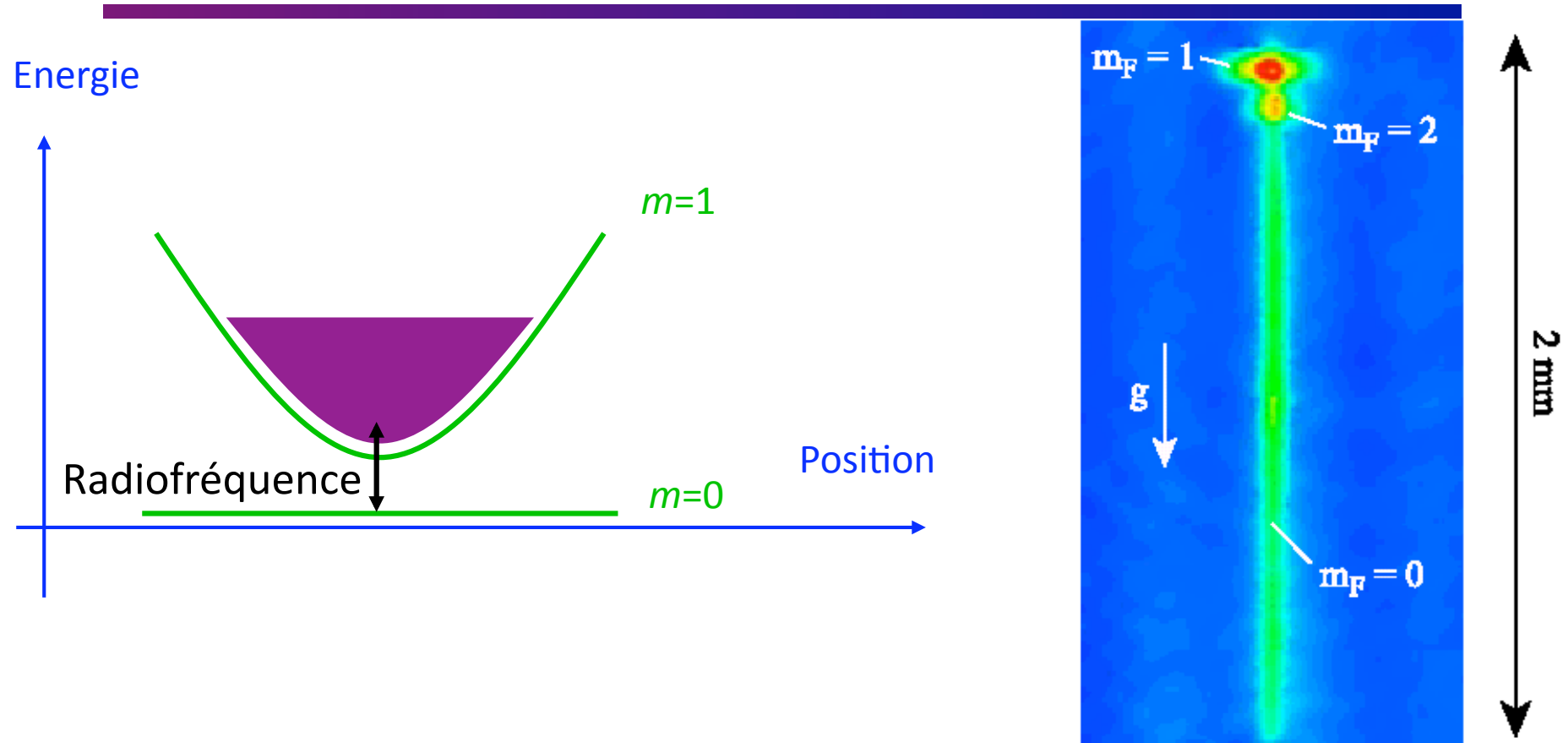


# Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques

---



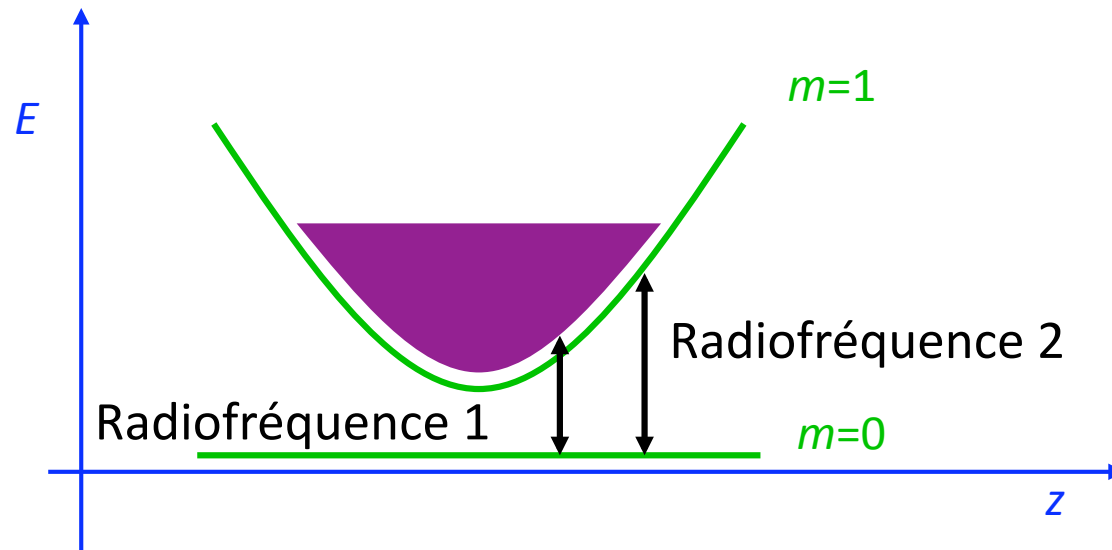
# Extraction d'une onde de matière



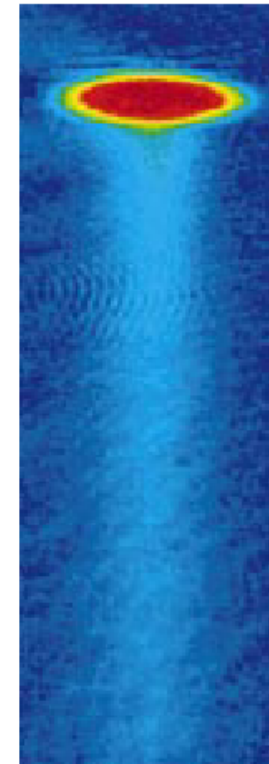
L'onde radio-fréquence fait basculer le moment magnétique des atomes situés au centre du piège magnétique, **elle est équivalente à une fente**

# Expérience de type fentes d'Young

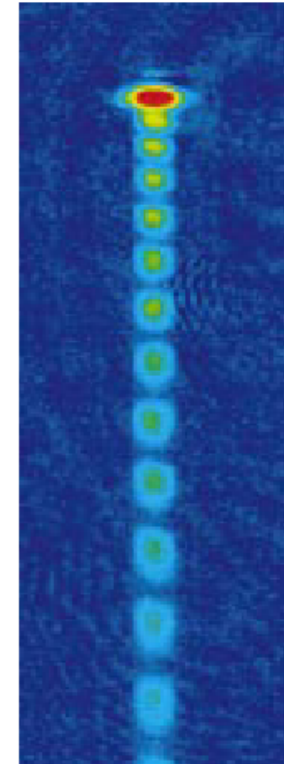
Expérience de type "fentes d'Young" = deux fentes



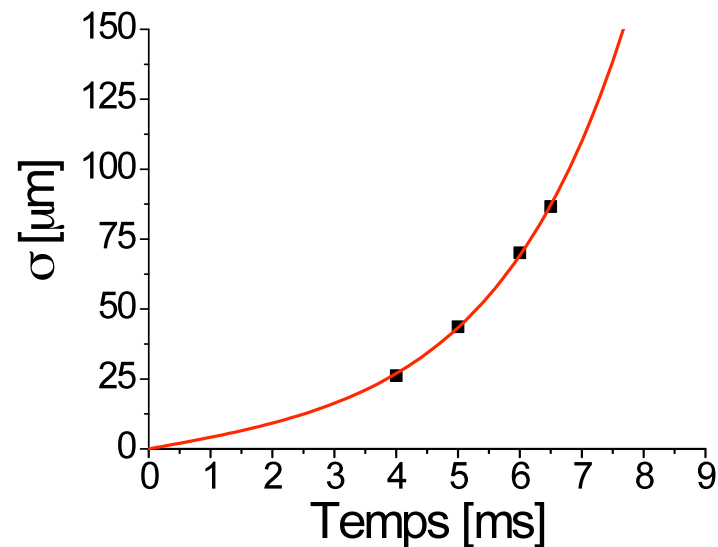
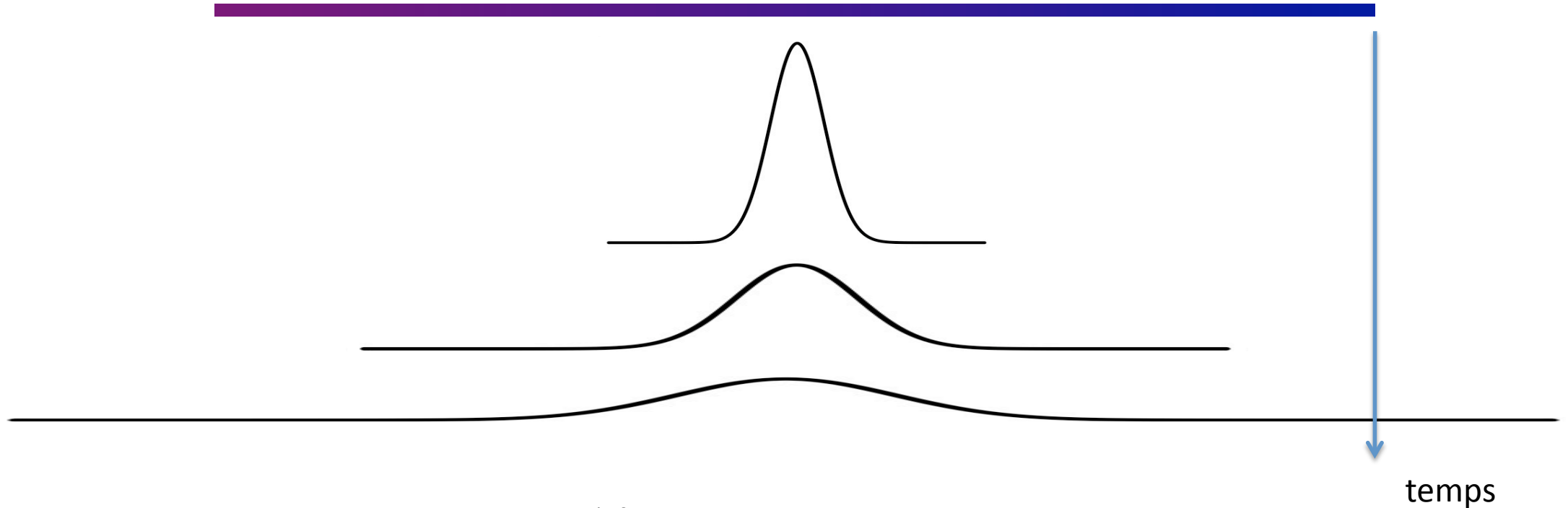
$T > T_c$



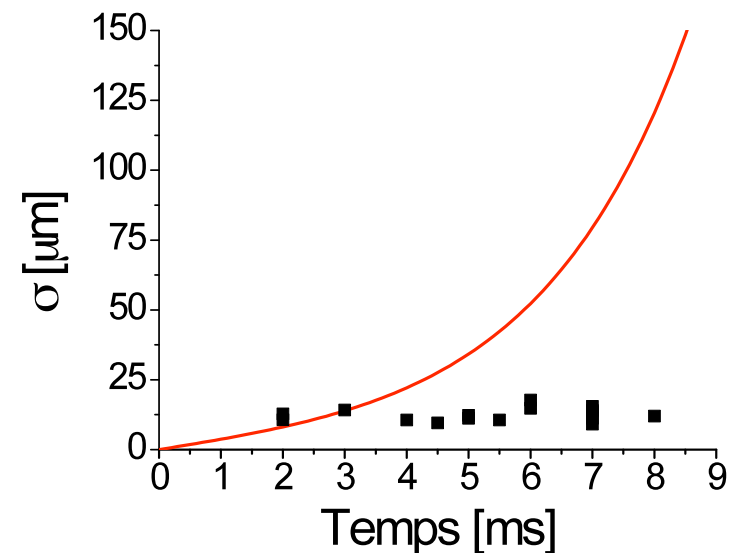
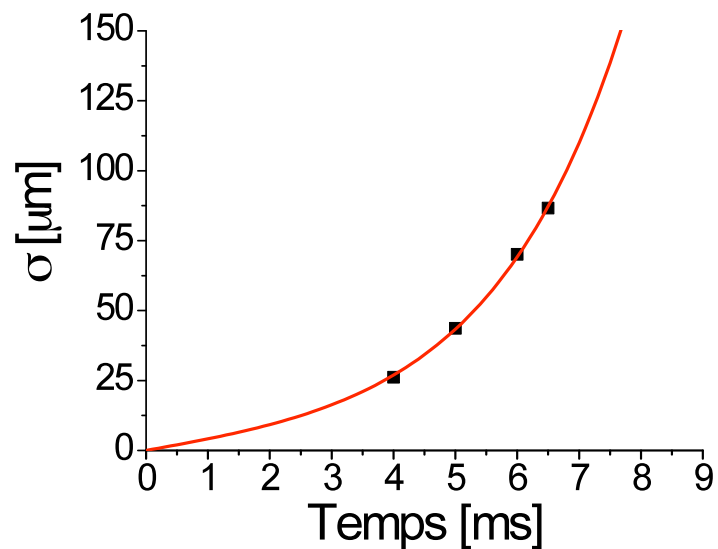
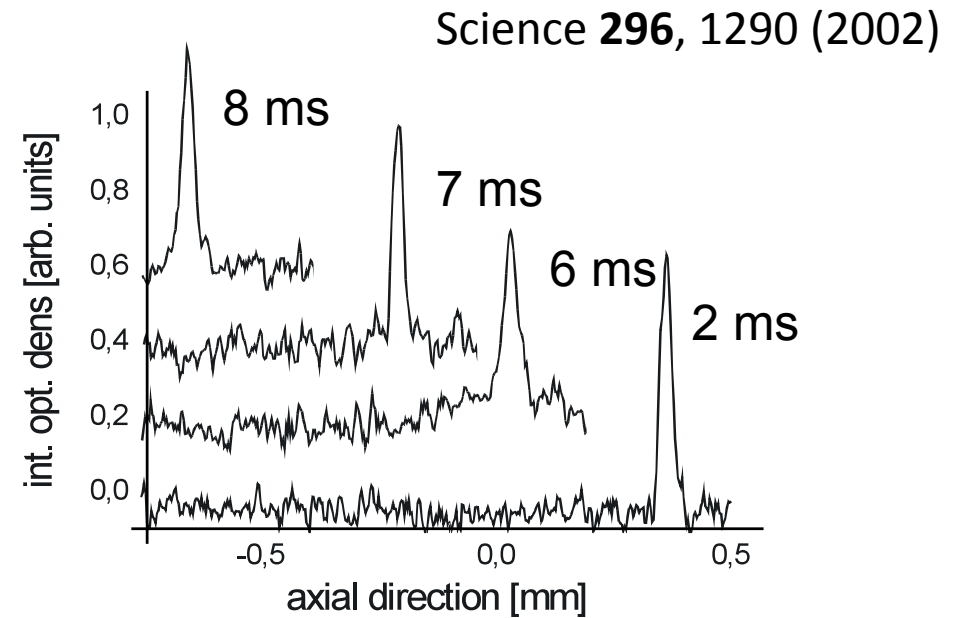
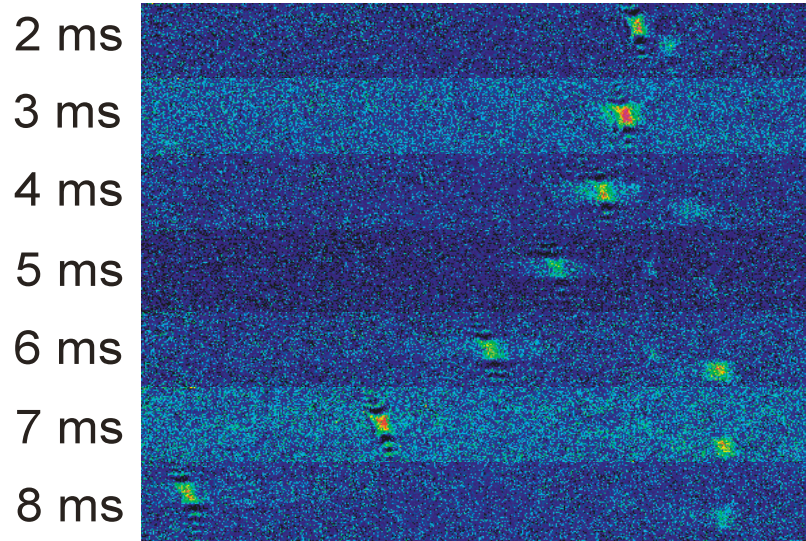
$T < T_c$



# Gaz quantique peut-il se comporter comme une bille « géante » ?



# Interactions attractives = soliton de matière (1D)

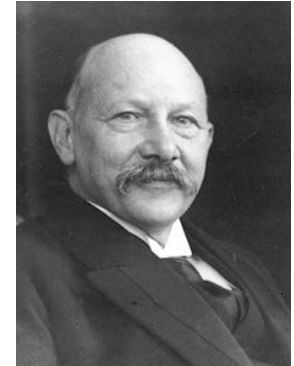




# Les basses températures: une histoire émaillée de surprises

---

**1908** (Leiden): H. K. Onnes liquéfie  
le gaz  $^4\text{He}$  en dessous de 4.2 K.



**1912** par le même groupe:  
*"On peut obtenir des conducteurs électriques de résistance nulle"*

**1927** W. H. Keesom découvre que l'hélium  
liquide existe sous deux formes différentes



**1927-1938** : en dessous de 2.17 K comportement  
étrange disparition de la viscosité ?!!!, le liquide  
ne bout plus ?!!!!

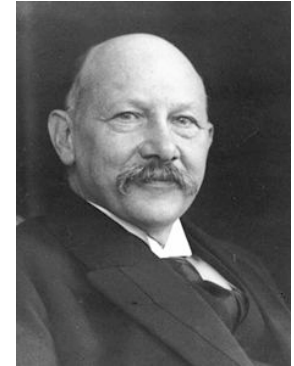
J. F. Allen, A. D. Misener and P. Kapitza



# Les basses températures: une histoire émaillée de surprises

---

**1908** (Leiden): H. K. Onnes liquéfie  
le gaz  $^4\text{He}$  en dessous de 4.2 K.



**1912** par le même groupe:

*"On peut obtenir des conducteurs électriques de résistance nulle"*

SUPRACONDUCTIVITE

**1927** W. H. Keesom découvre que l'hélium  
liquide existe sous deux formes différentes



SUPERFLUIDITE

**1927-1938** : en dessous de 2.17 K comportement  
étrange disparition de la viscosité ?!!!, le liquide  
ne bout plus ?!!!!

J. F. Allen, A. D. Misener and P. Kapitza



# Emergence de la mécanique quantique à l'échelle macroscopique

---

La **supraconductivité** et la **superfluidité** sont des manifestations spectaculaires de la mécanique quantique qui émergent à une échelle macroscopique

Etoiles à neutrons :  $10^{39}$  neutrons/cm<sup>3</sup>

Hélium liquide :  $10^{22}$  atomes/cm<sup>3</sup>

Gaz d'alcalins dilués :  $10^{14}$  atomes/cm<sup>3</sup>

...

# Peut-on relier ces différents domaines ?

Notion de simulateur quantique (Feynman, 1982):

Le physicien sait souvent mettre en équation mais ne sait pas résoudre ces équations ...

reproduire les ingrédients physique d'un problème donné avec un contrôle de tous les paramètres

## Exploring the thermodynamics of a universal Fermi gas

S. Nascimbène<sup>1</sup>, N. Navon<sup>1</sup>, K. J. Jiang<sup>1</sup>, F. Chevy<sup>1</sup> & C. Salomon<sup>1</sup>

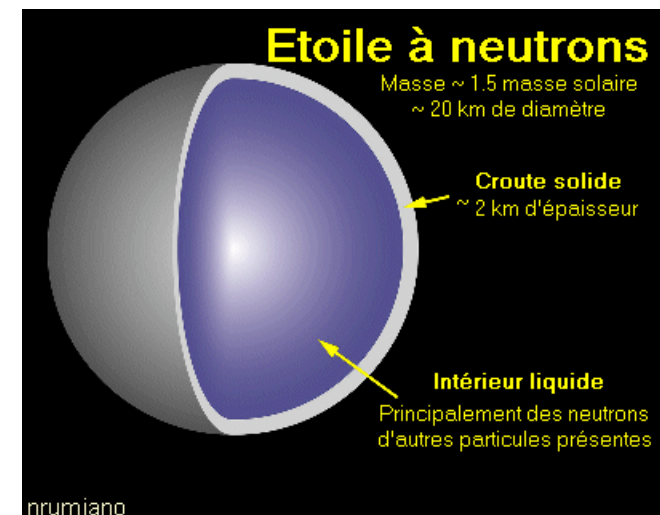
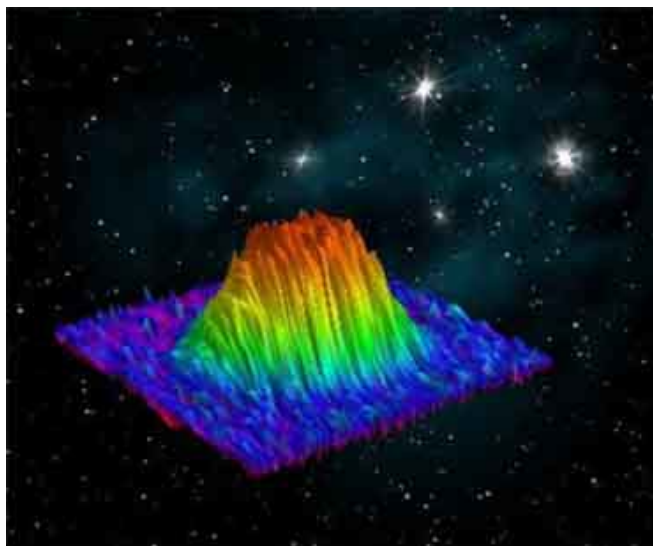
Nature **463**, 1057 (2010)

Gaz de fermions ultrafroids



gaz de neutrons (couche externe)

régime fortement corrélés



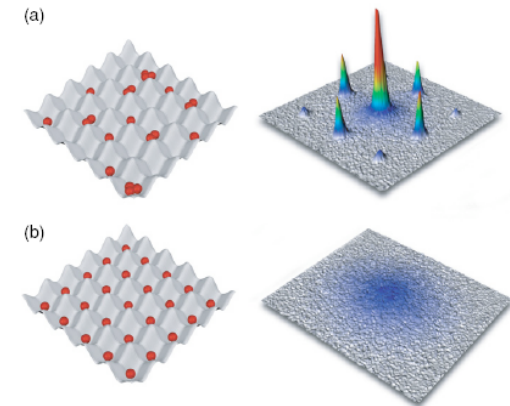
# Autres exemples de simulateur quantique

## Matière condensée : Transition métal-isolant

*Nature* **419**, 51 (2002)

**Phase superfluide** : délocalisation des atomes sur tout le réseau.

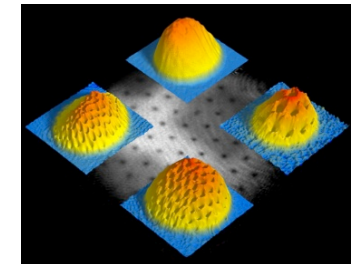
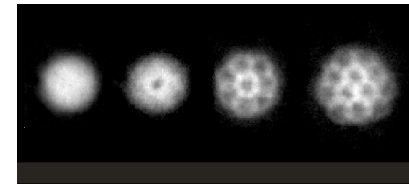
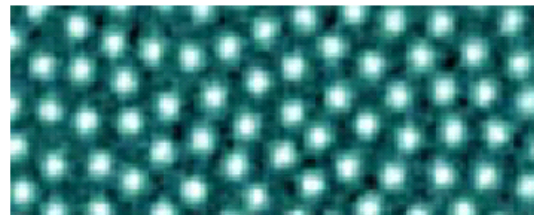
**Phase isolante** : les atomes sont localisés sur les sites du réseau.



## Matière condensée : Transition BEC-BCS

### Gaz quantique en rotation

Les tourbillons quantiques  
analogues à ceux des  
milieux supraconducteurs



## Simuler des équations de la physique : l'exemple de l'équation de Dirac

**Equation de Dirac** (1928) = unifie la mécanique quantique et la relativité restreinte (particule de spin demi-entier)

Cette équation a prédit l'existence d'anti-particule. Observation en 1932 du positron

Mouvement Zitterbewegung simulée avec des ions piégés : *Nature* **463**, 68 (2010)

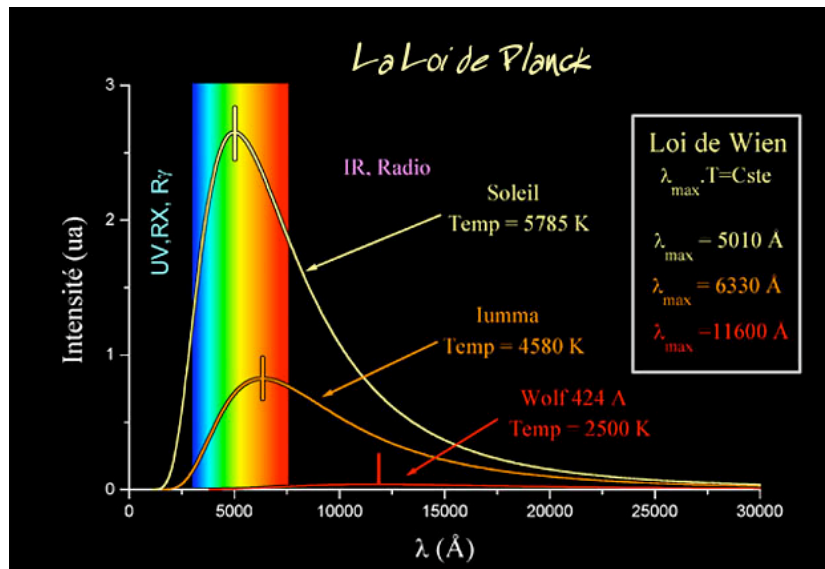
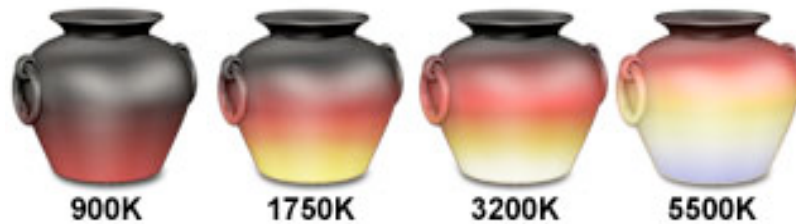
Paradoxe de Klein, même groupe *Physical Review Letters*, **106**, 060503 (2011)

Equation de Dirac modifiée (fermions de Majorana) ...

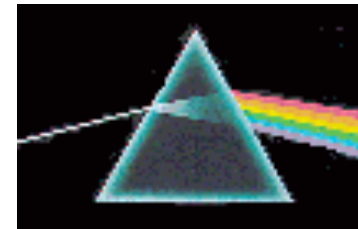
# Emergence de la mécanique quantique à l'échelle macroscopique : un exemple de la vie courante

## Température et émission de lumière

La matière massive à  
température finie émet  
de la lumière



Soleil : spectre continu



Seule la mécanique quantique permet de comprendre quantitativement cette émission (Planck 1900).