

Dualité onde-corpuscule

David Guéry-Odelin

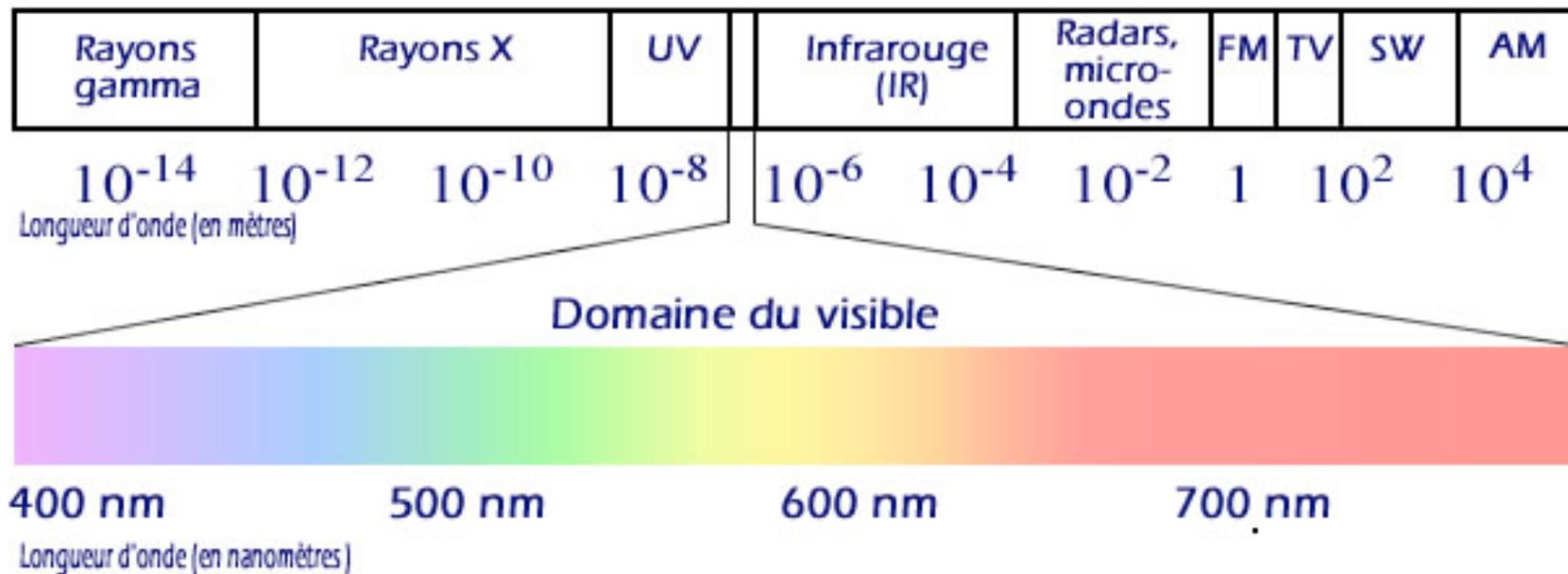
Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité
Université Paul Sabatier, Toulouse



midipyrenees.fr



Les ondes électromagnétiques

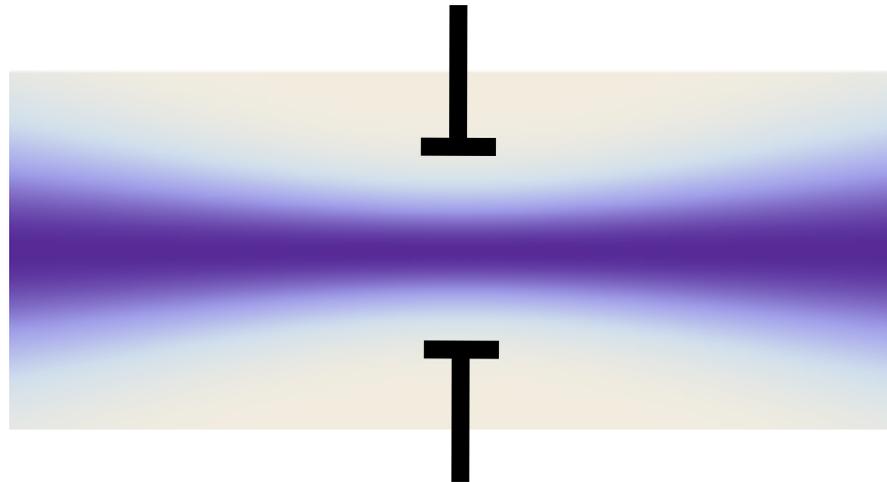


Fréquence ν (ne dépend pas du milieu)

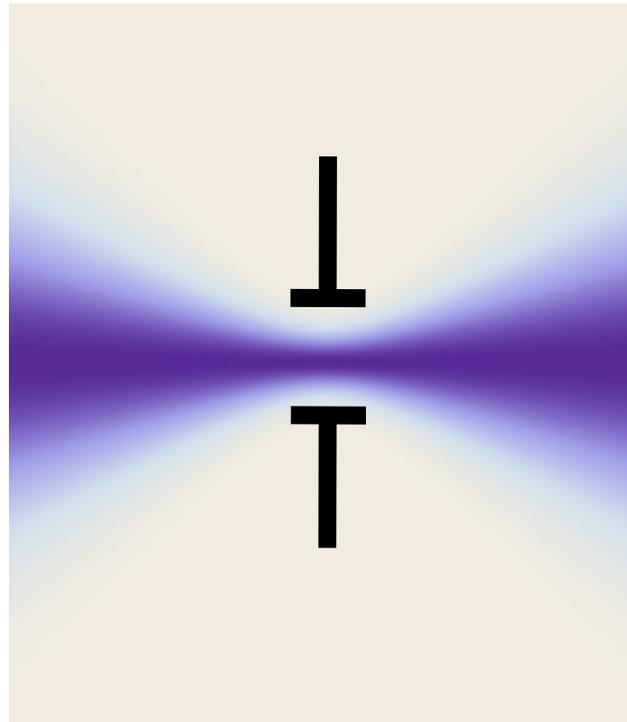
Longueur d'onde λ (qui dépend du milieu)

Quelques comportements ondulatoires

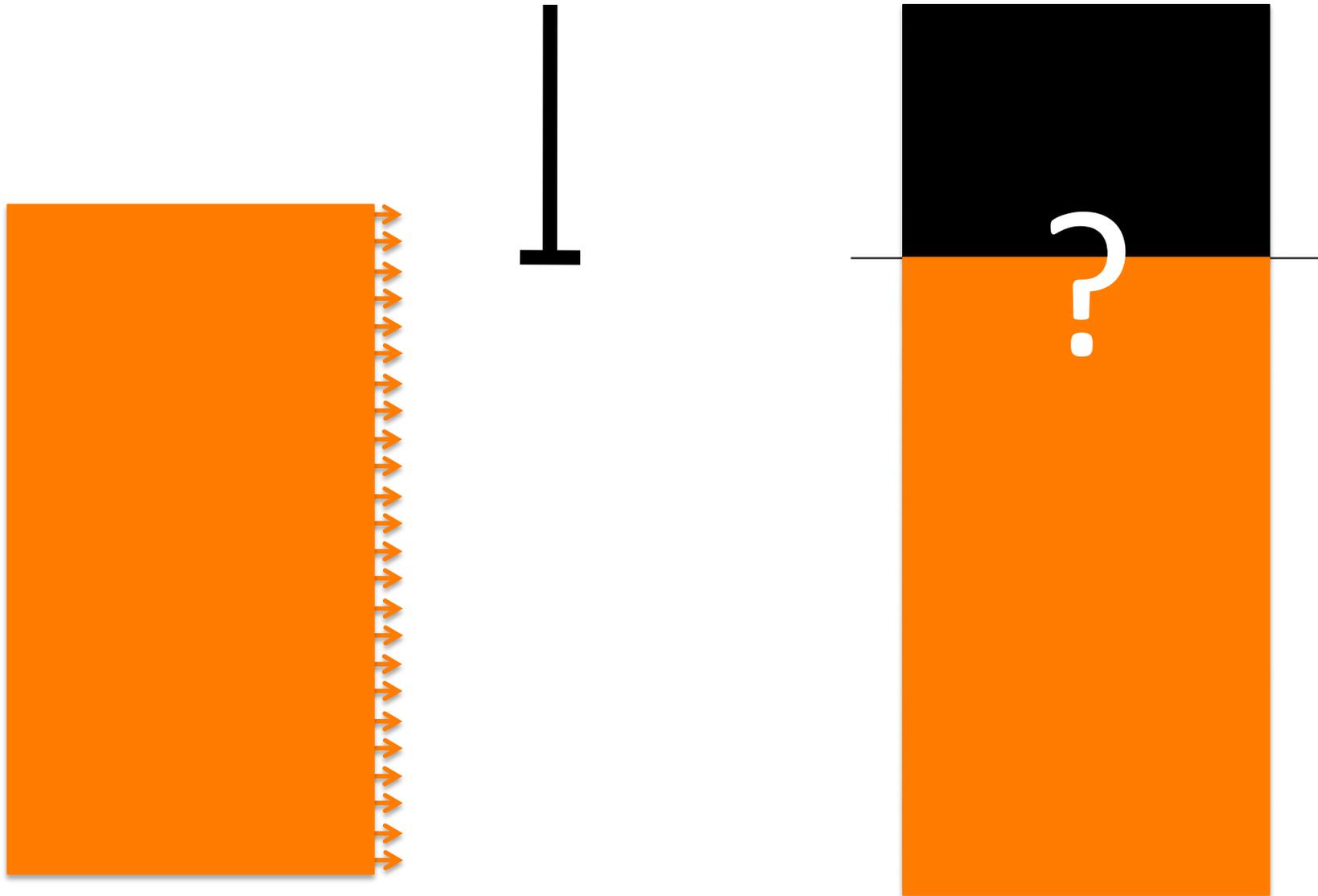
Comportement diffractif de la lumière



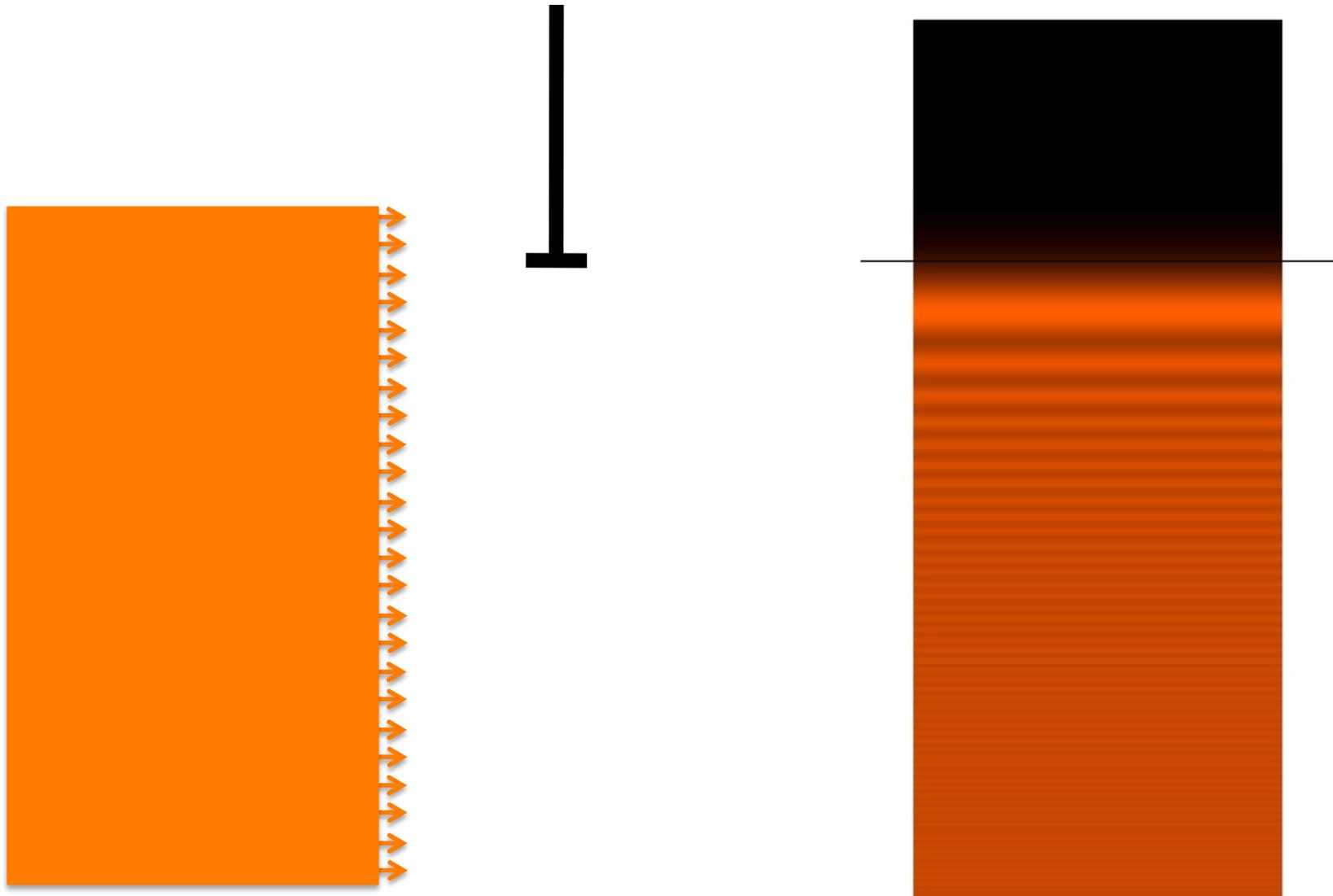
Comportement diffractif de la lumière



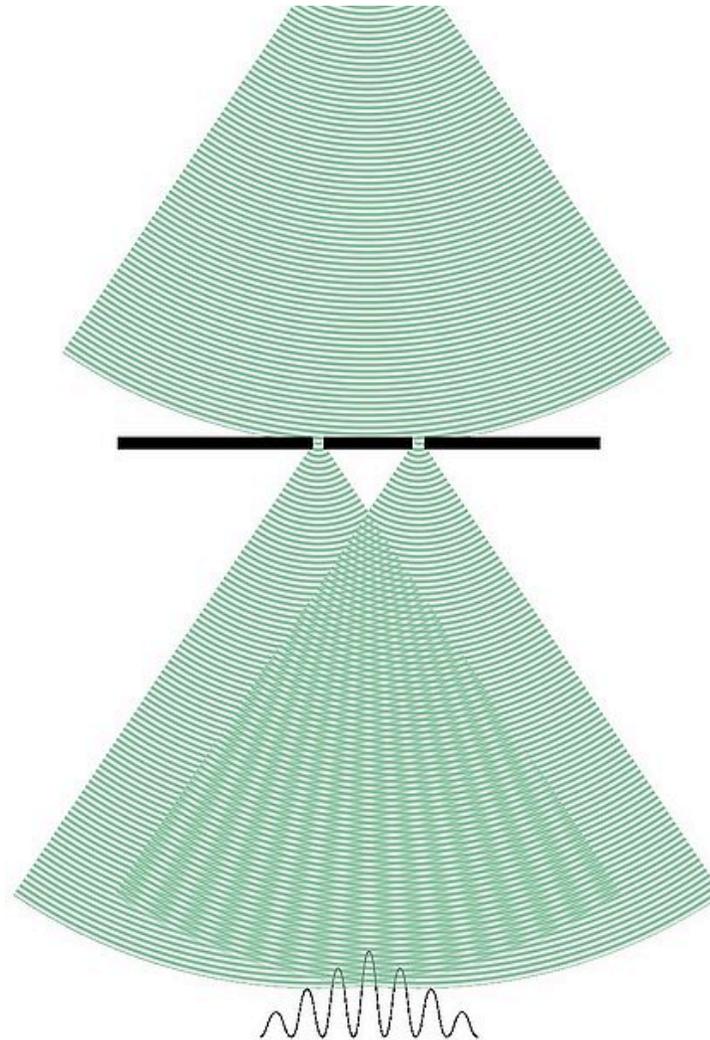
Diffraction par un bord d'écran



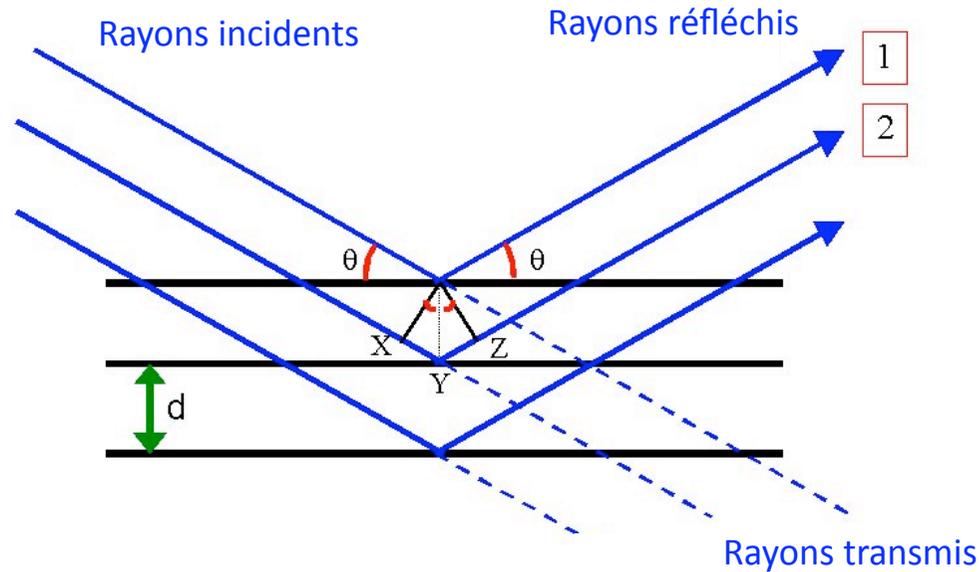
Diffraction par un bord d'écran



La fameuse expérience des fentes d'Young



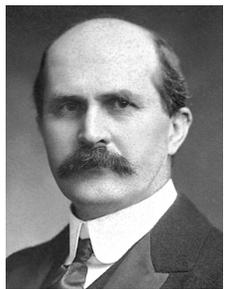
La diffraction de Bragg (1913)



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

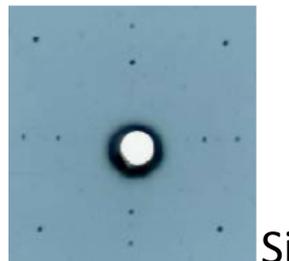


W. L. Bragg

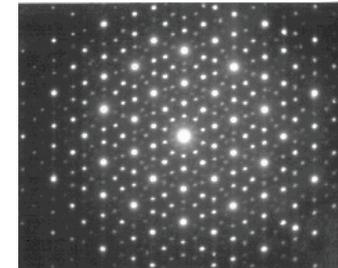
Prix Nobel de physique 1915



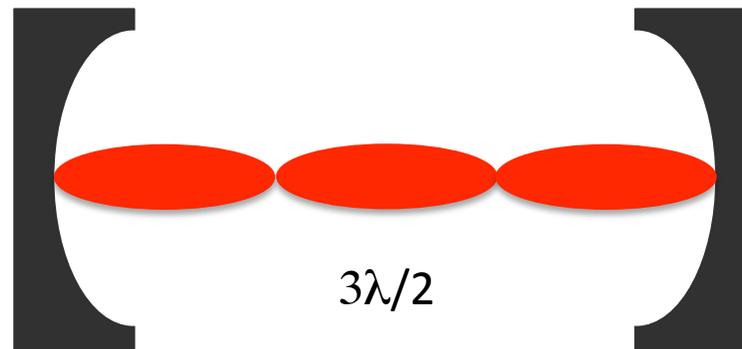
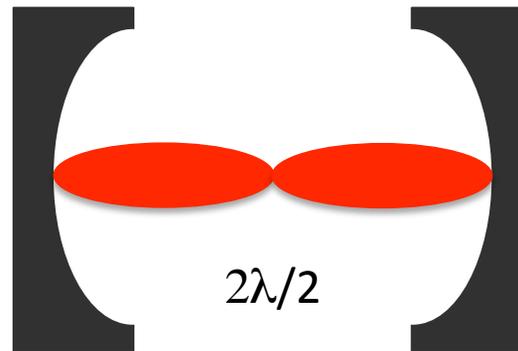
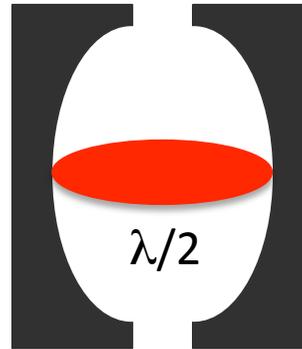
Sonder la structure de la matière
grâce aux rayons X



Si

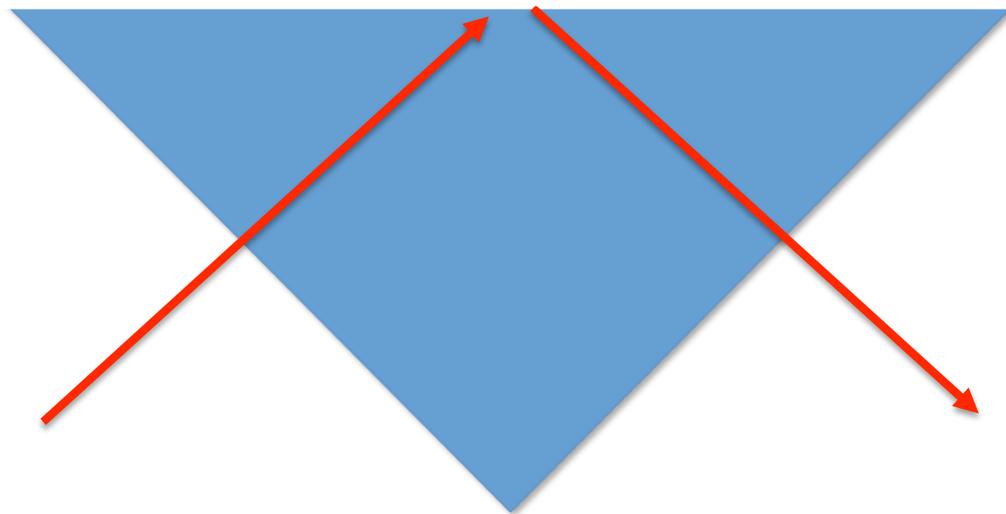


Les modes longitudinaux d'une cavité



Réflexion totale

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

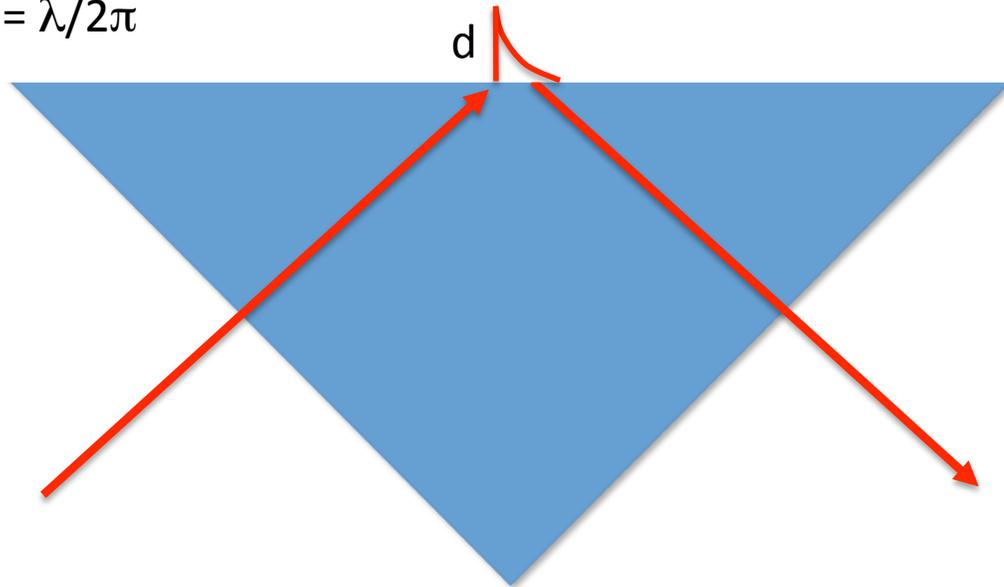


Les ondes évanescentes

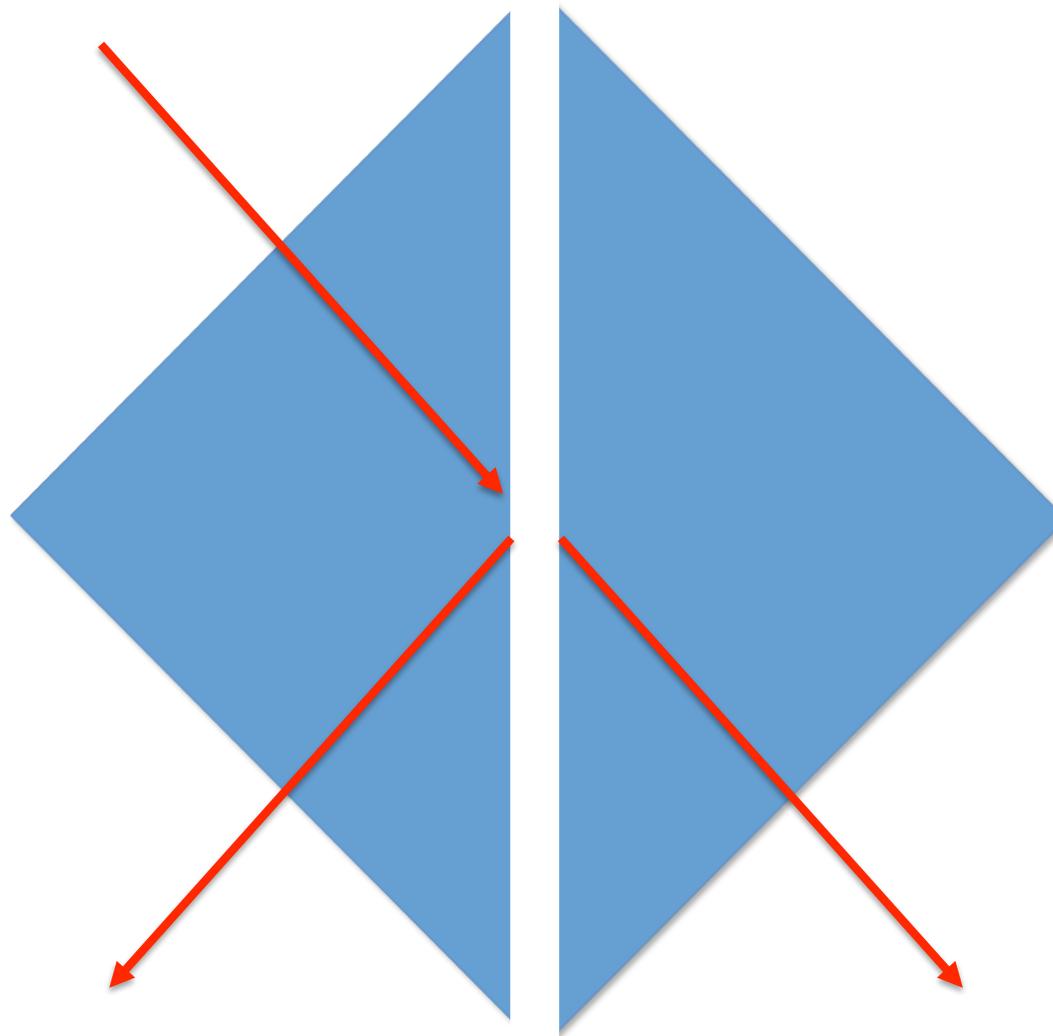
L'optique géométrique est une approximation
de la description ondulatoire

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

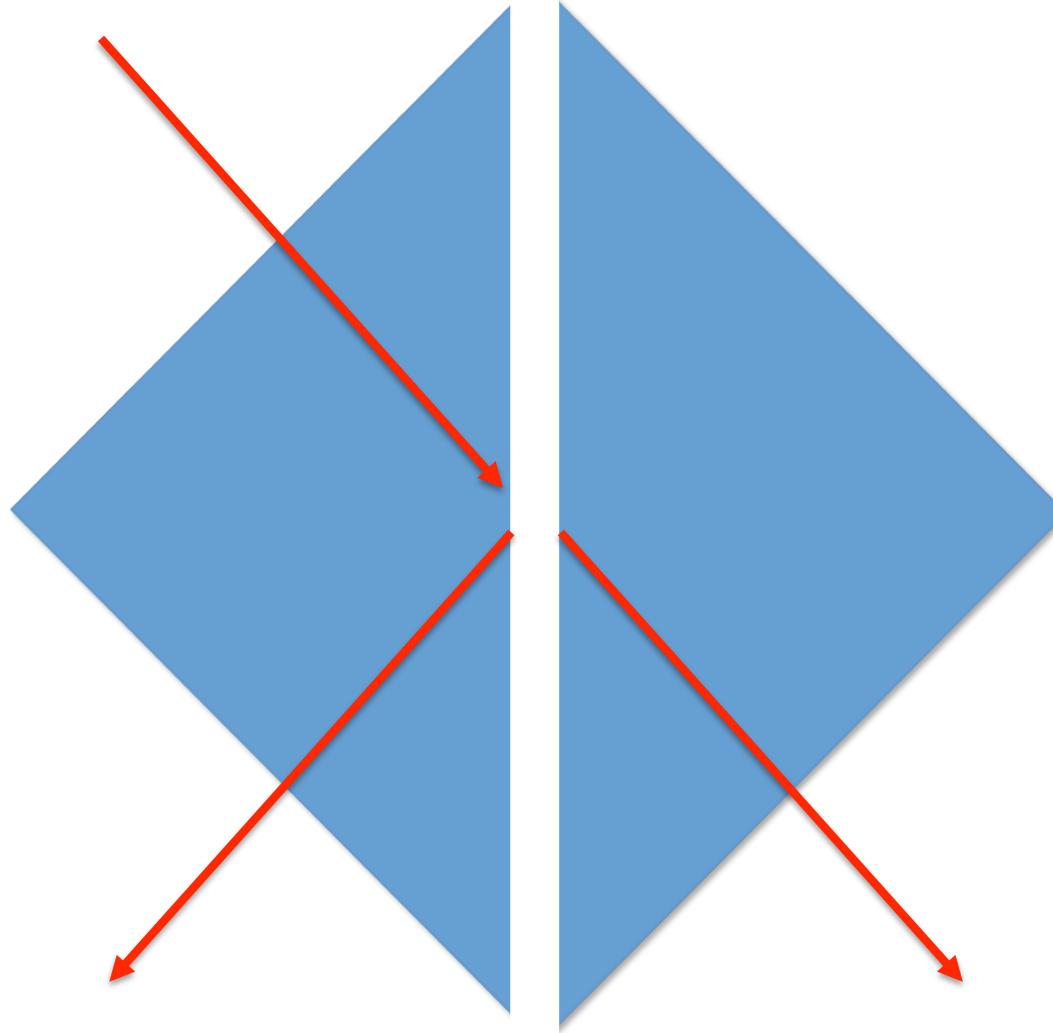
Taille typique = $d = \lambda/2\pi$



L'effet tunnel avec des ondes électromagnétiques



L'effet tunnel avec des ondes électromagnétiques

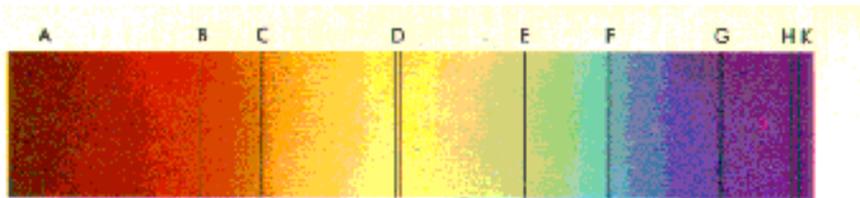


L'effet tunnel est un effet ondulatoire
Grande sensibilité à la distance de séparation

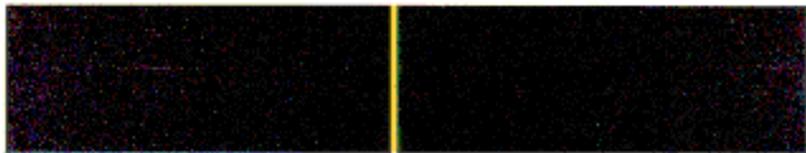
Interaction d'un atome avec la lumière

Les couleurs émises : une source d'information

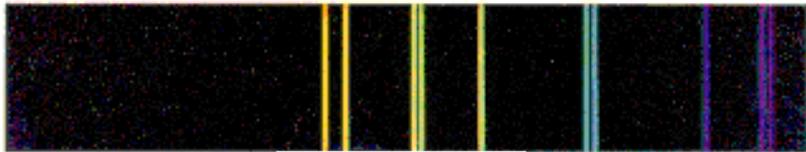
L'histoire de la mécanique quantique tire en partie son origine des études spectrales faites au XVIII et XIX ième siècle



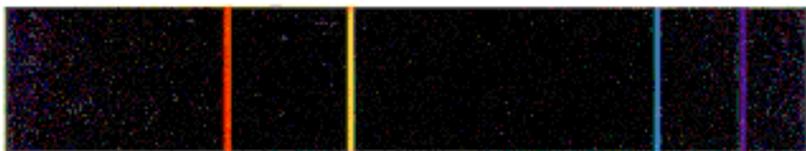
Spectre du soleil



Sodium



Mercure



Lithium



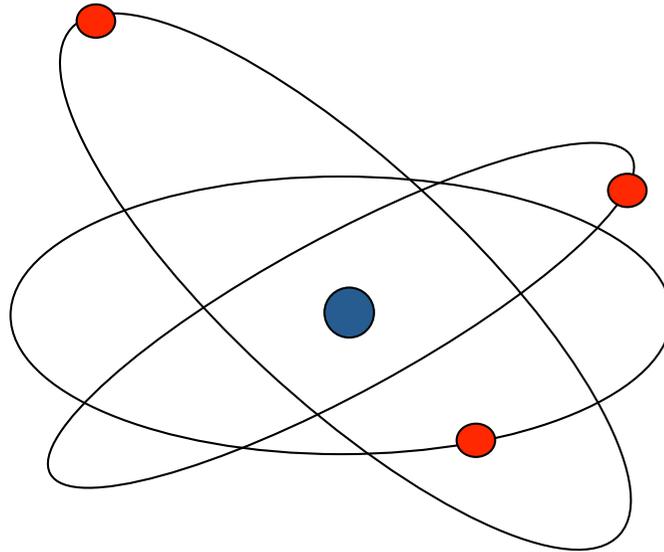
Hydrogène

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



La conception de l'atome après les expériences de Rutherford

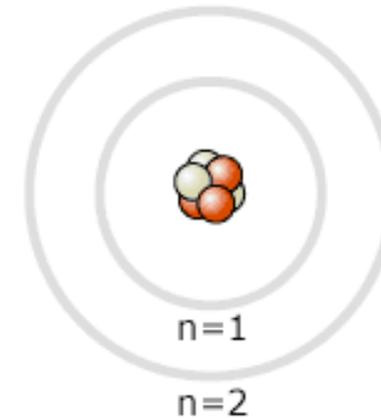
Bohr souligne le problème de l'instabilité du modèle planétaire proposé par Rutherford



Instabilité dynamique car les électrons se repoussent

Le modèle de Niels Bohr (1913)

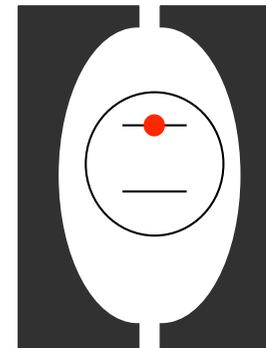
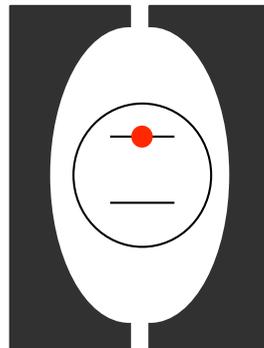
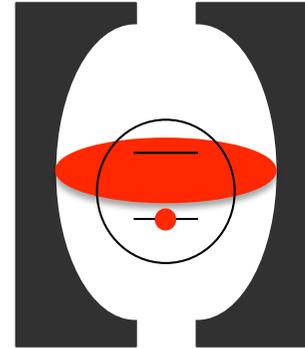
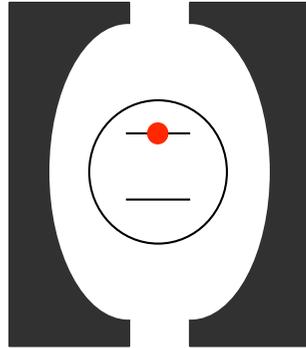
Il n'existe que des orbites discrètes
(notion d'état stationnaire)



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 ν et longueur d'onde λ

Dualité
onde-corpuscule

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



Louis de Broglie

Exemple lumière : longueur d'onde λ (couleur) et corpuscule = photons

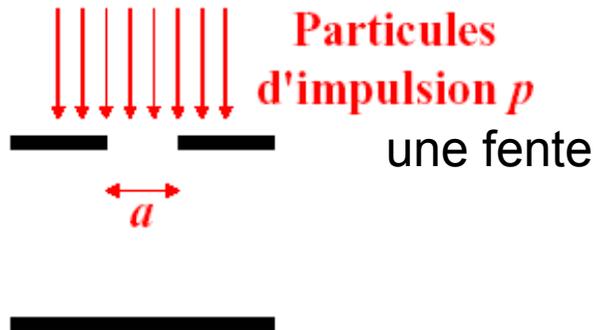
Pour une particule matérielle

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



Prix Nobel de physique 1929

Ordres de grandeur



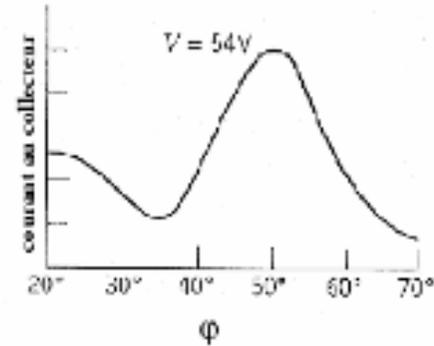
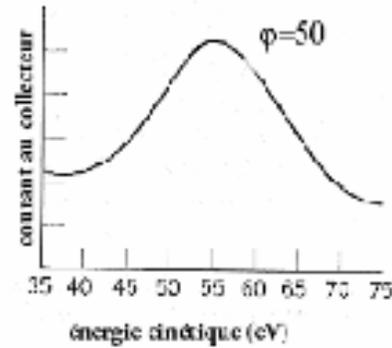
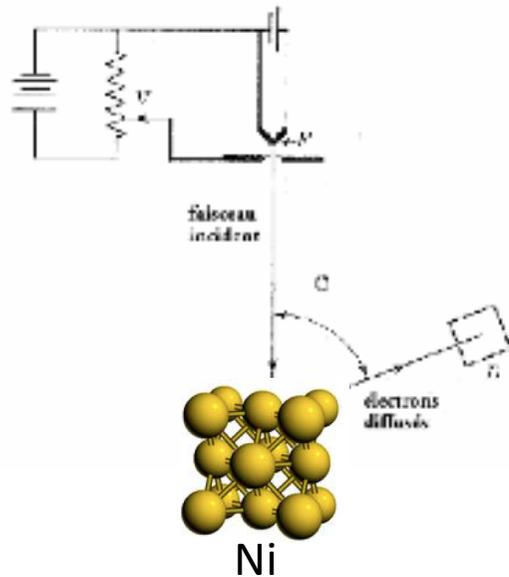
Les phénomènes non classiques
dominent quand

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

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 Davison (1881-1958)
Lester Germer (1896-1971)

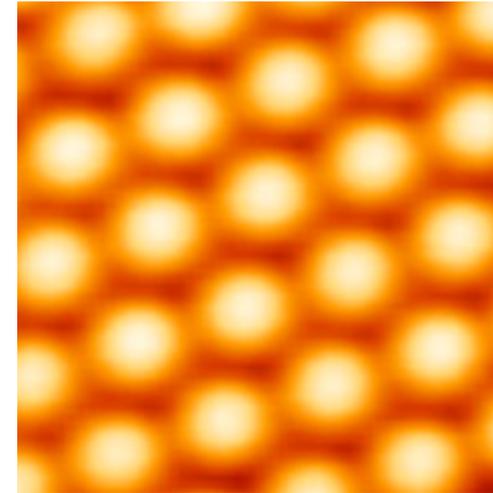
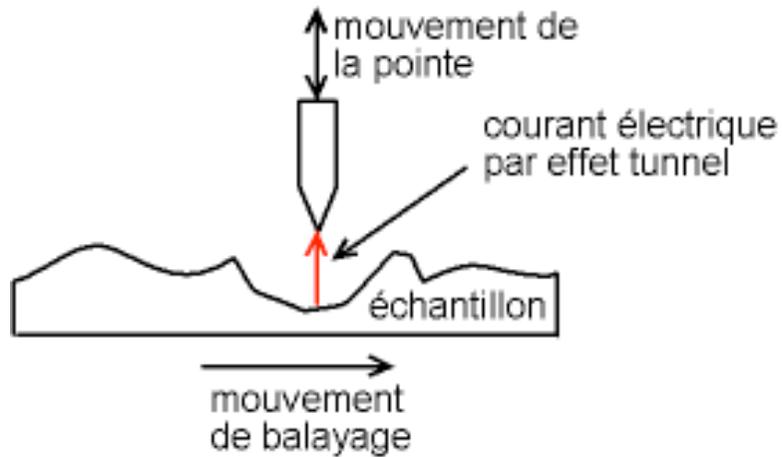


George Paget Thomson (1892-1975)



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

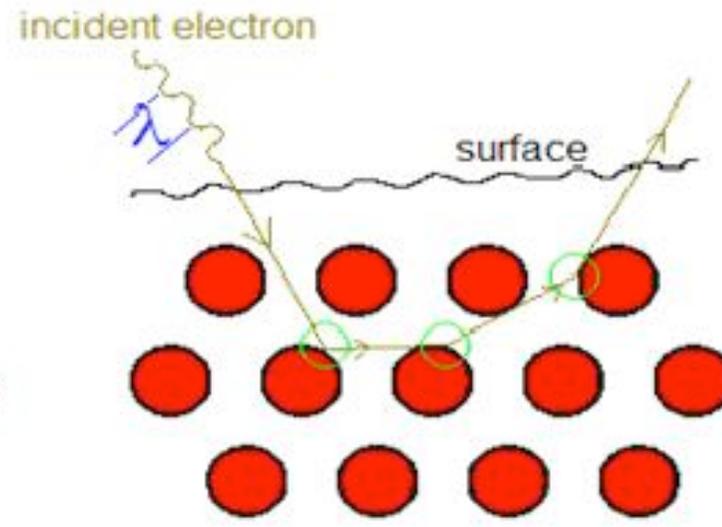
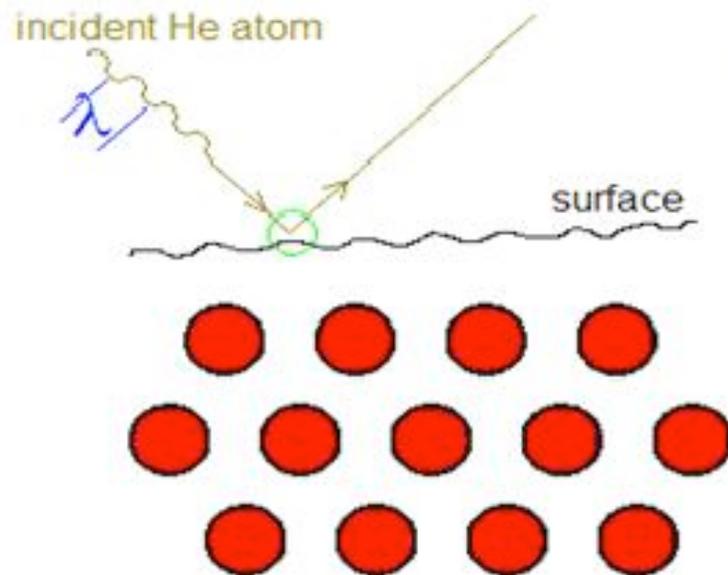
L'expérience d'Estermann et Stern 1932



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)

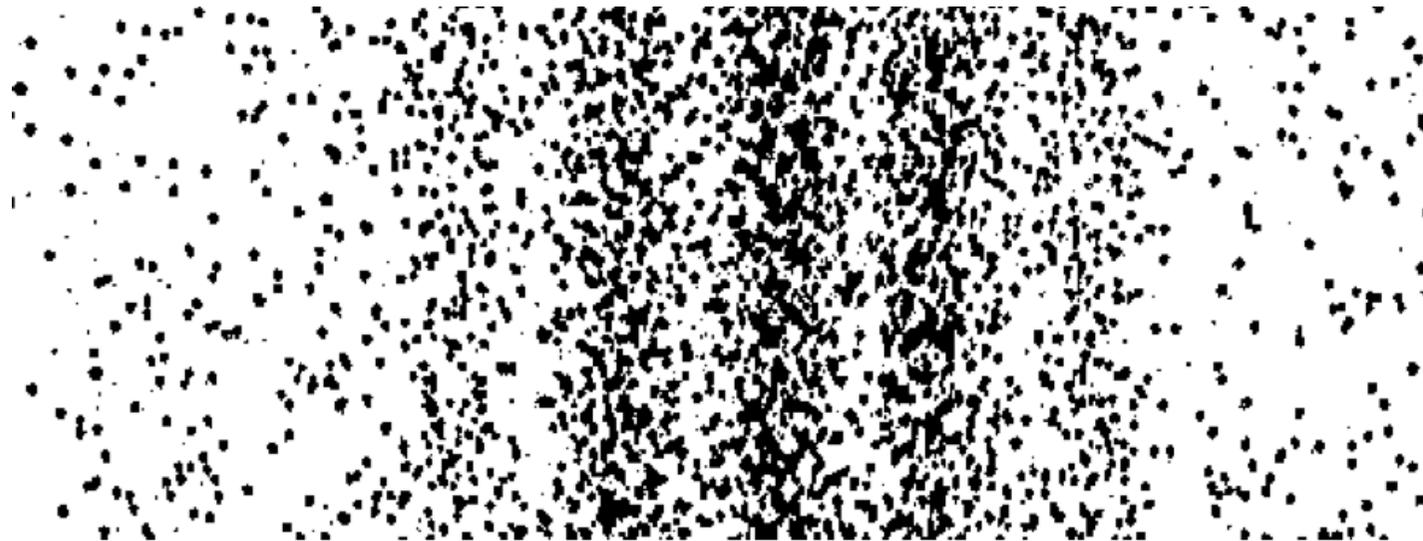
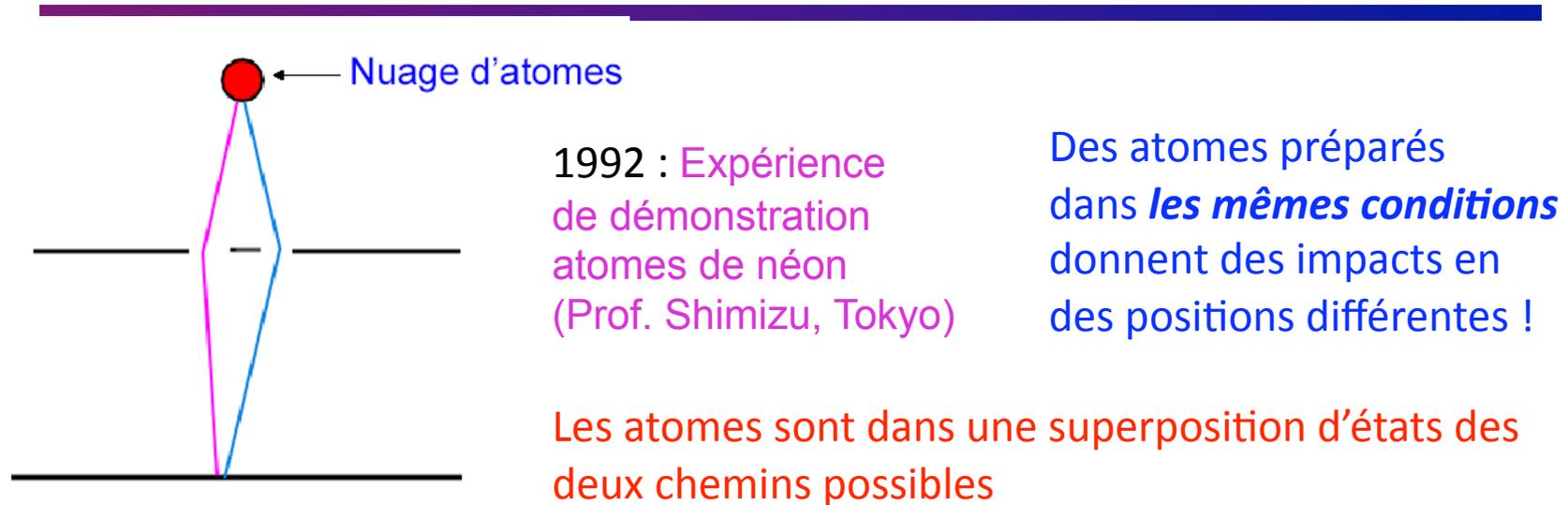


Mesure : postulat de Max Born (1926)



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

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



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

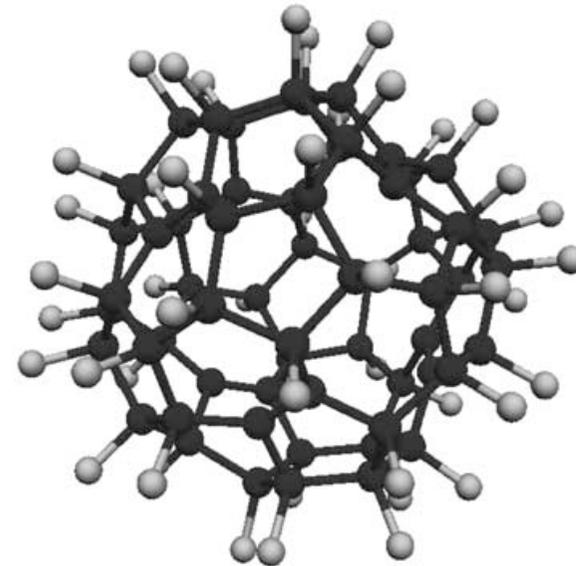
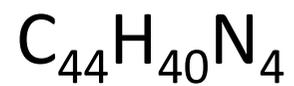
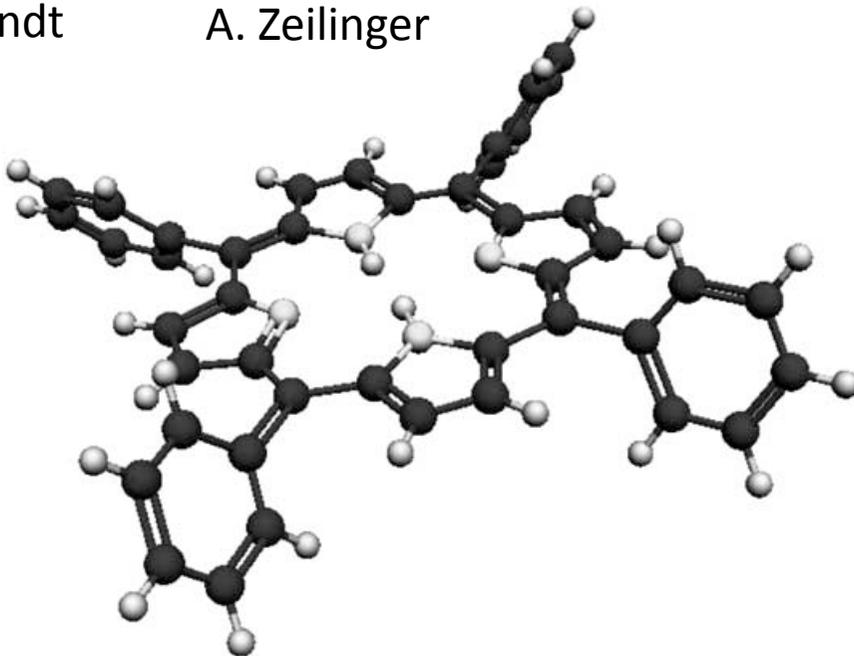
Diffraction de grosses molécules



M. Arndt



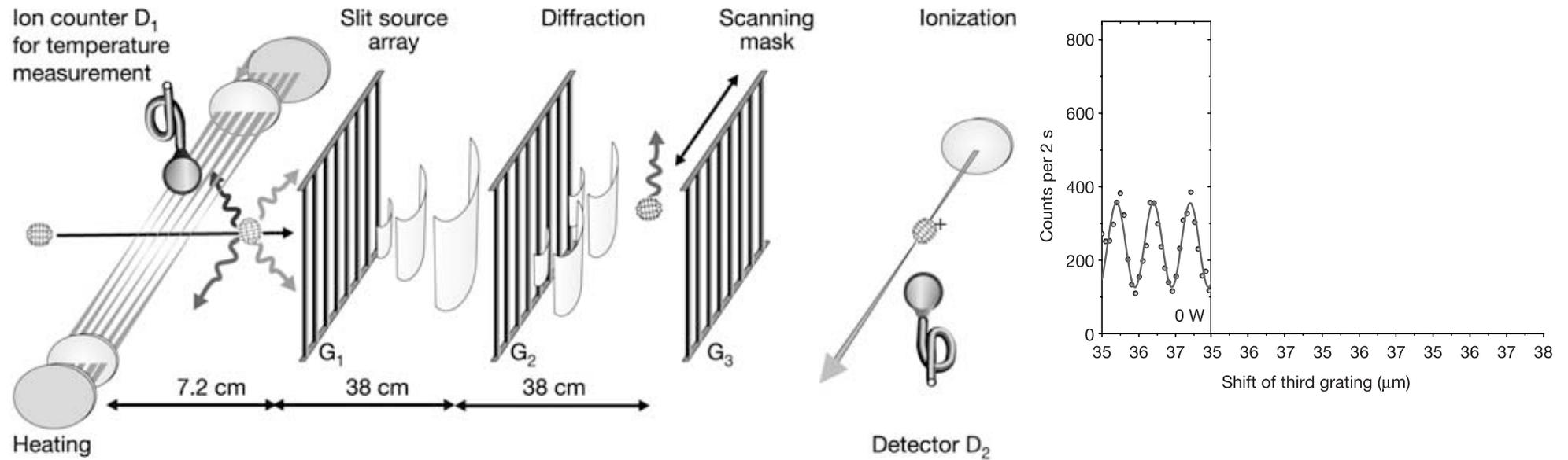
A. Zeilinger



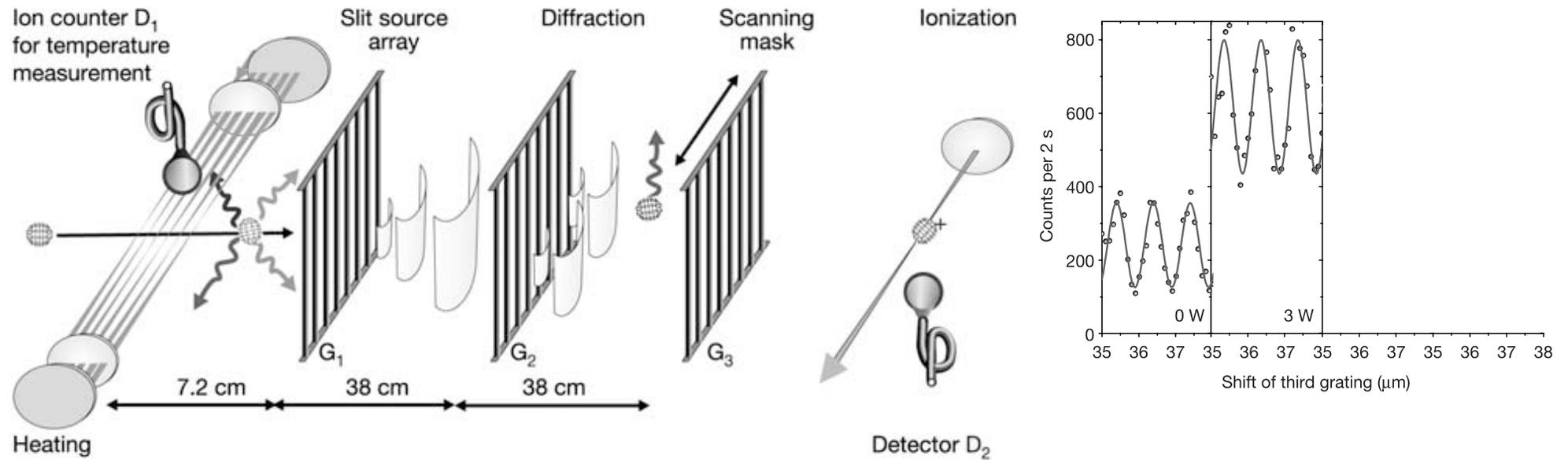
M. Arndt *et al.* Nature **401**, 680 (1999).

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

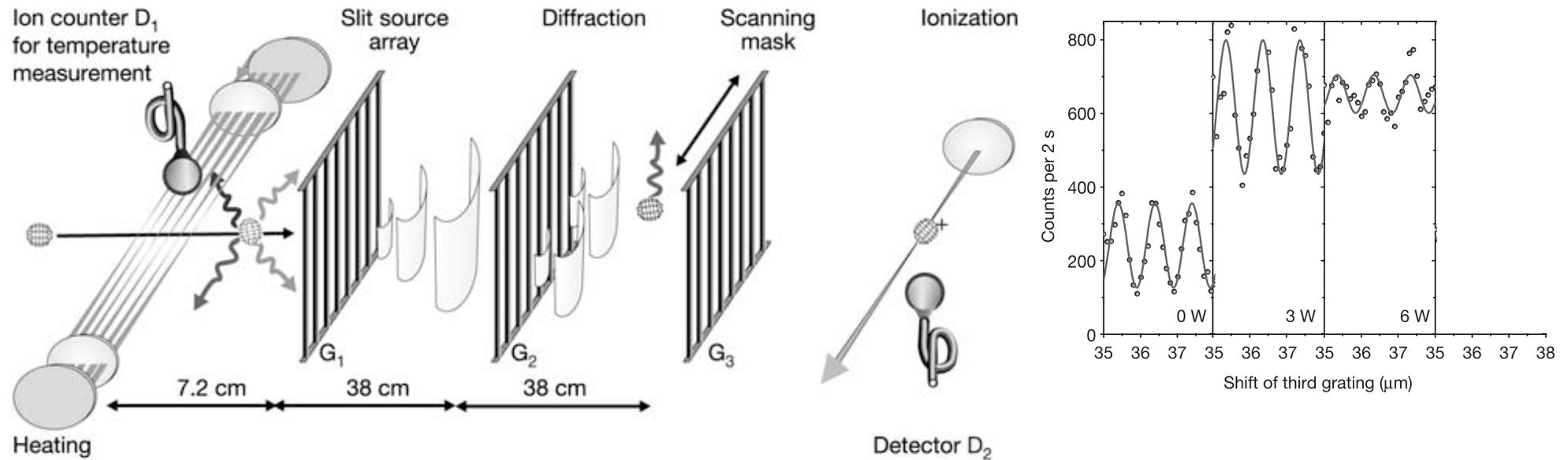
Décohérence : vers le monde macroscopique



Décohérence : vers le monde macroscopique

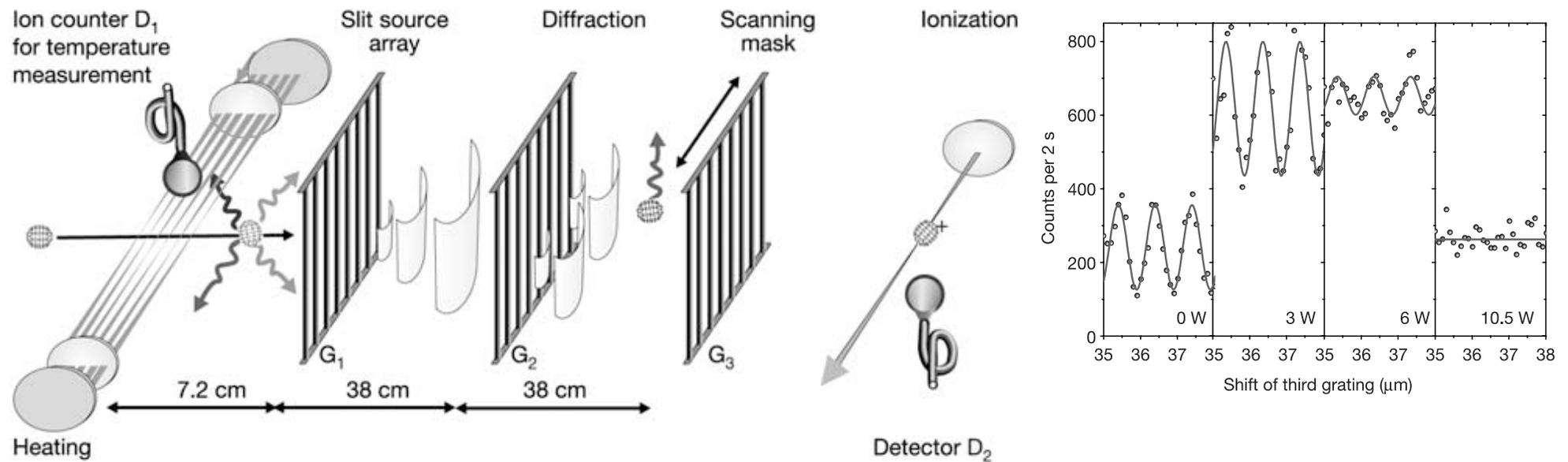


Décohérence : vers le monde macroscopique



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

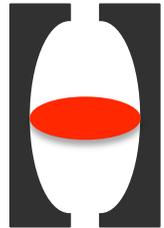
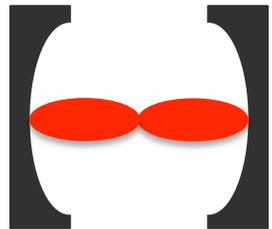
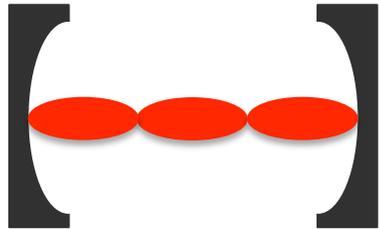
Décohérence : vers le monde macroscopique



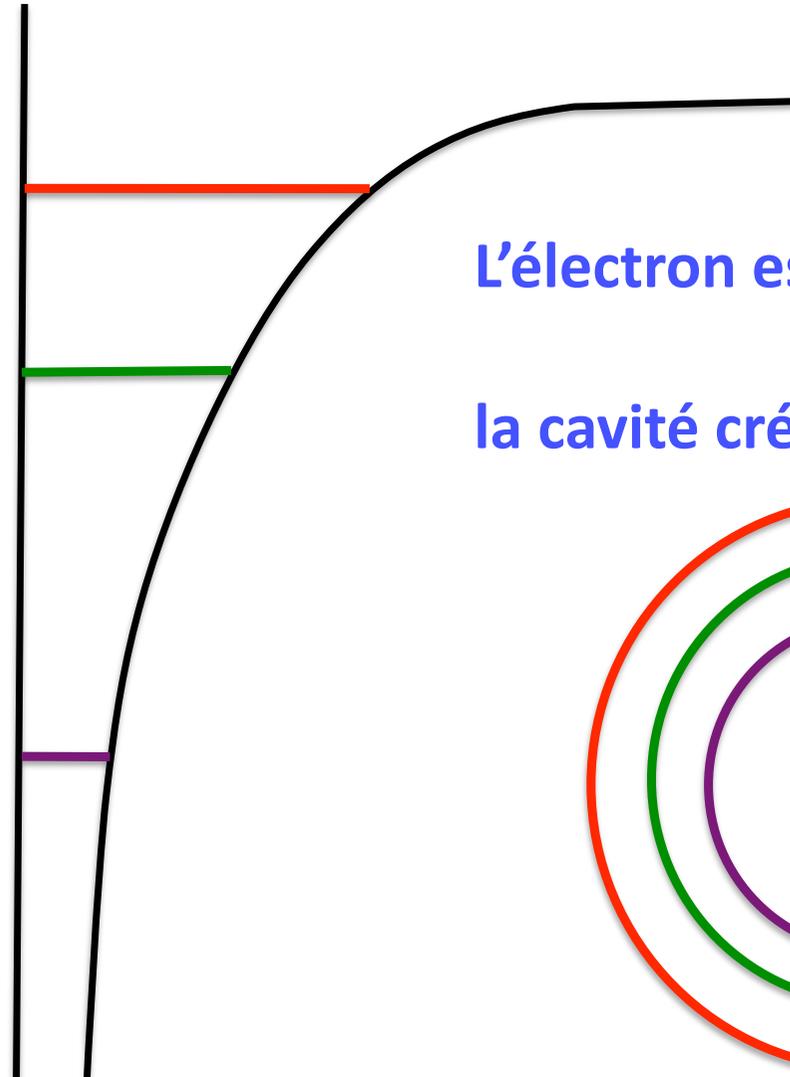
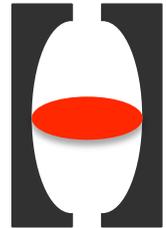
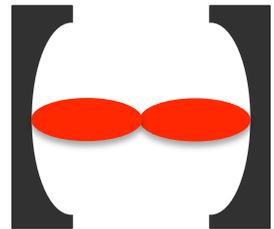
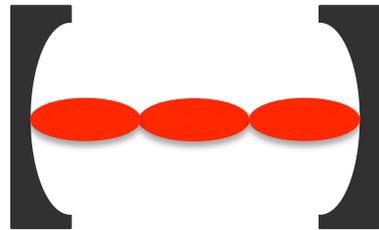
La possibilité de localiser le chemin suivi par le biais des photons émis supprime le caractère ondulatoire de la distribution des atomes sur l'écran

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

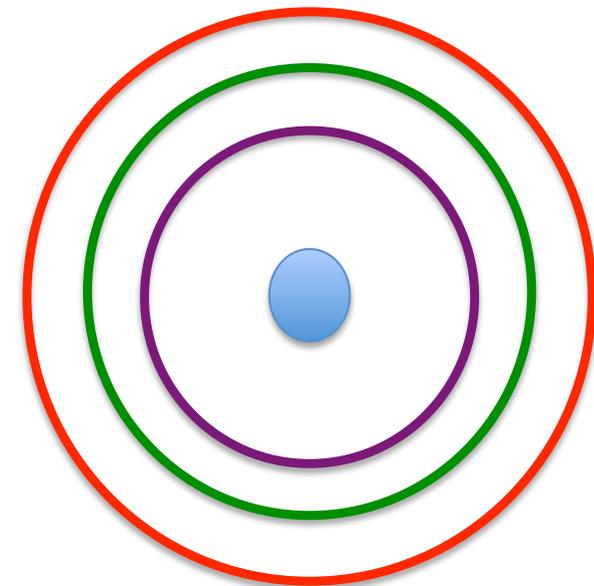
Interprétation ondulatoire des orbites de Bohr (1913)



Interprétation ondulatoire des orbites de Bohr (1913)

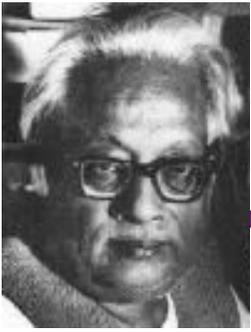


L'électron est une onde dans
la cavité créée par le proton

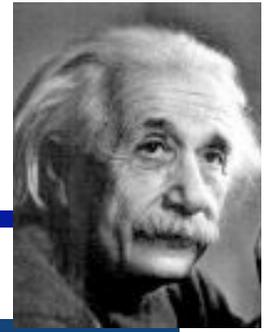


Atome de Bohr

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 λ

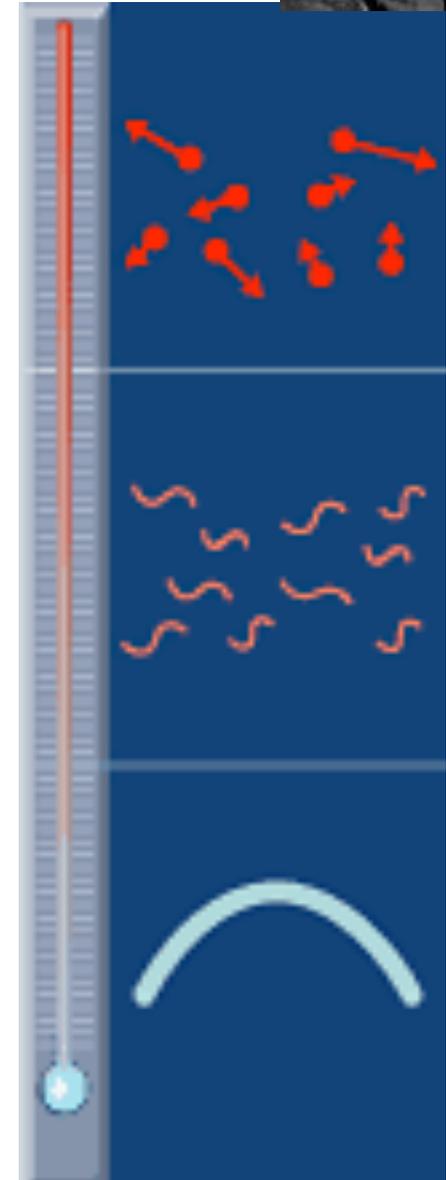
A température ordinaire : $\lambda \ll d$ i.e. comportement
« corpusculaire ».

Si T diminue, λ augmente

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

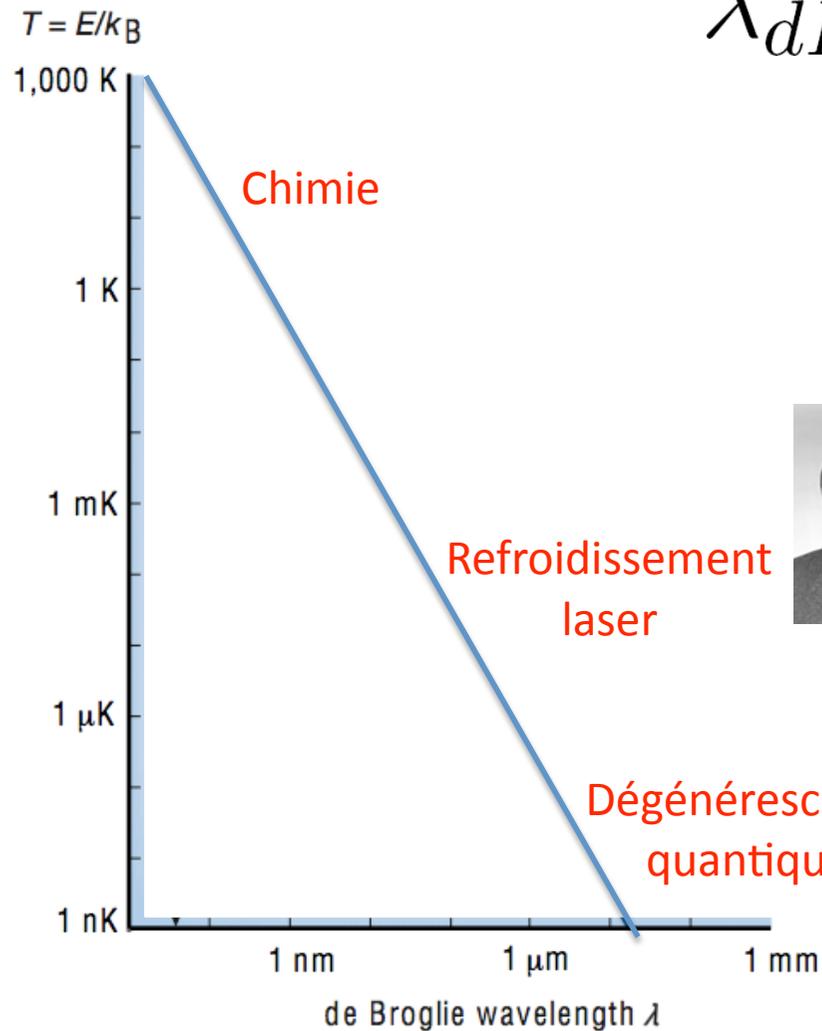
Einstein à Ehrenfest:

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



Basses températures et grande longueur d'onde de de Broglie

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



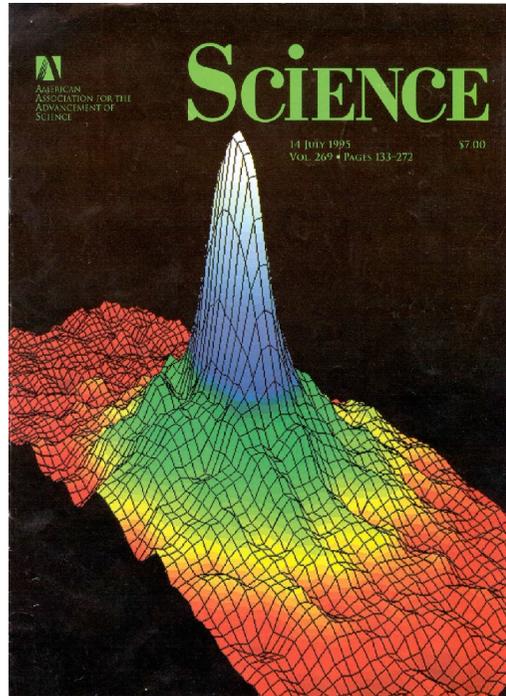
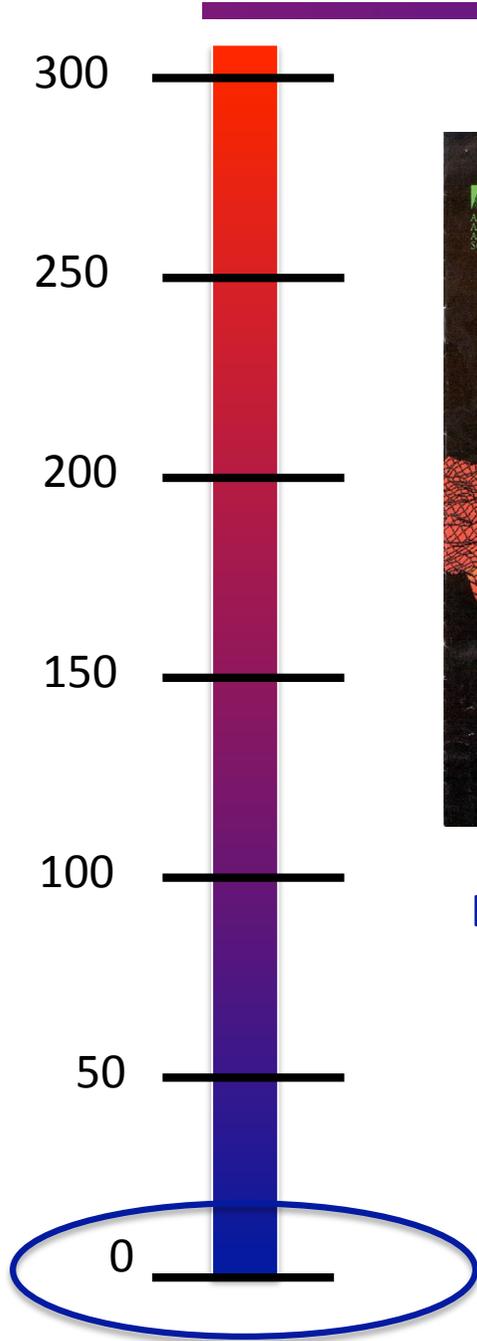
Prix Nobel de physique 1997
W. Phillips, S. Chu, C. Cohen-Tannoudji



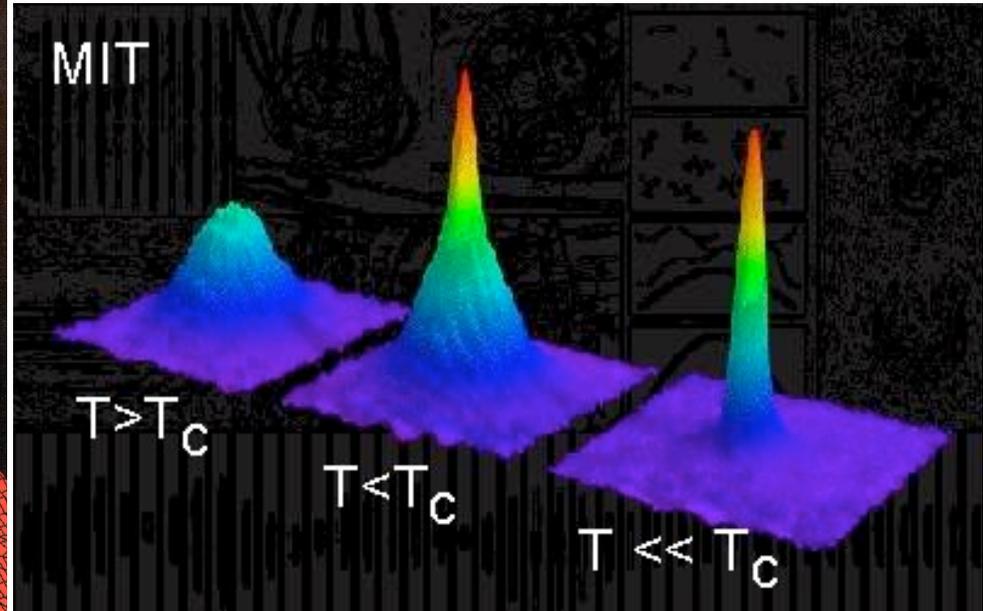
Prix Nobel de physique 2001
E. Cornell, C. Wieman, W. Ketterle

Condensation de Bose-Einstein

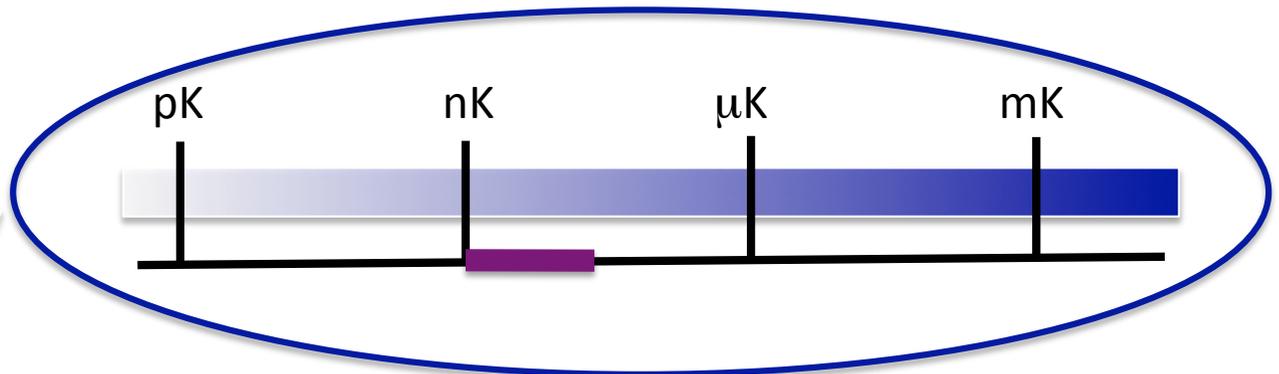
Taille $\sim 100 \mu\text{m}$! Température de condensation 200 nK



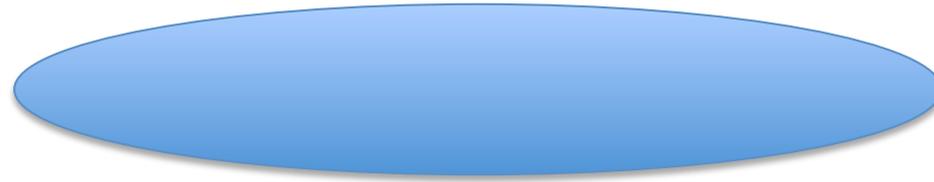
Boulder, Colorado
E. Cornell et C. Wieman



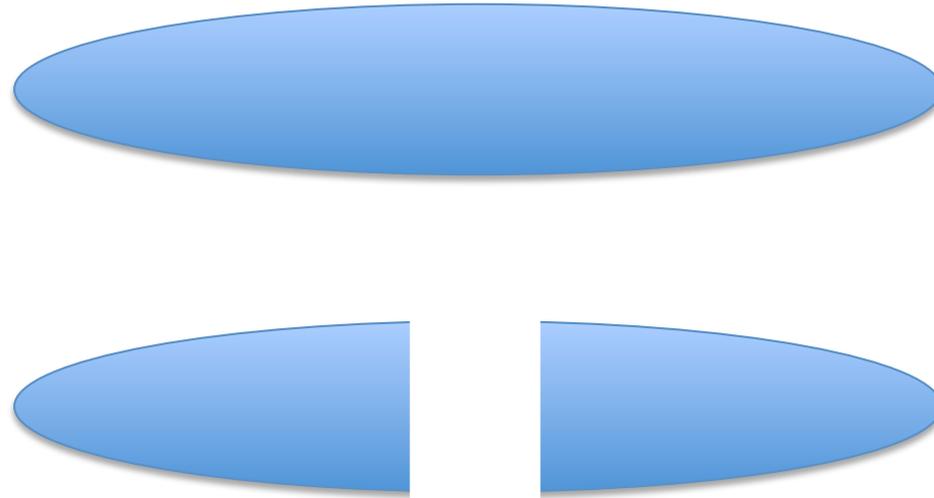
MIT
W. Ketterle



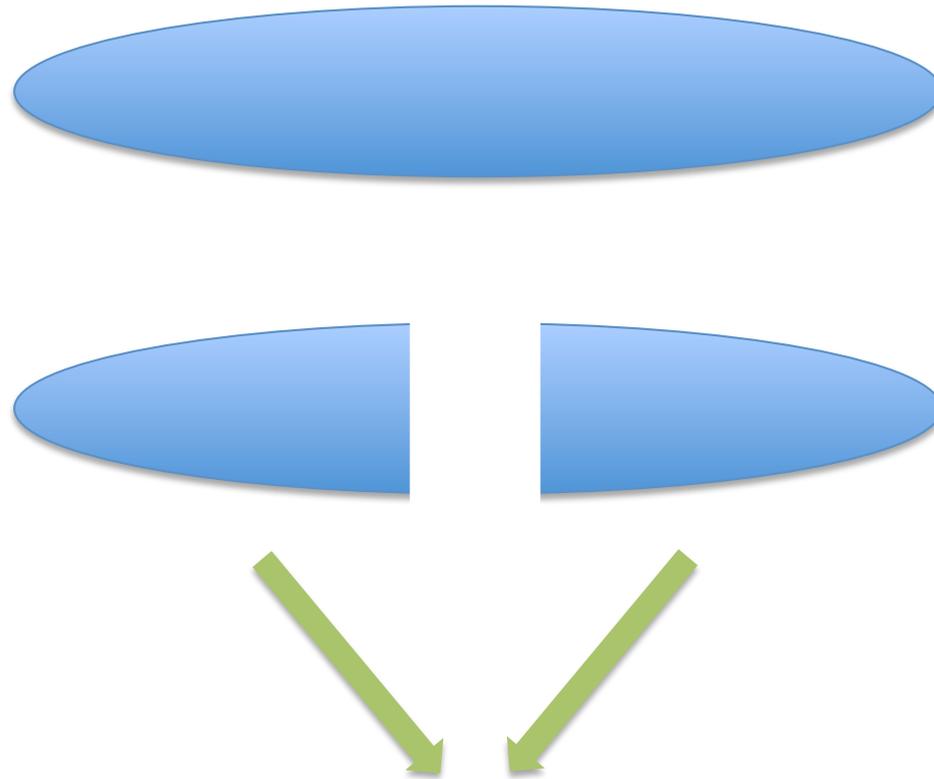
Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques



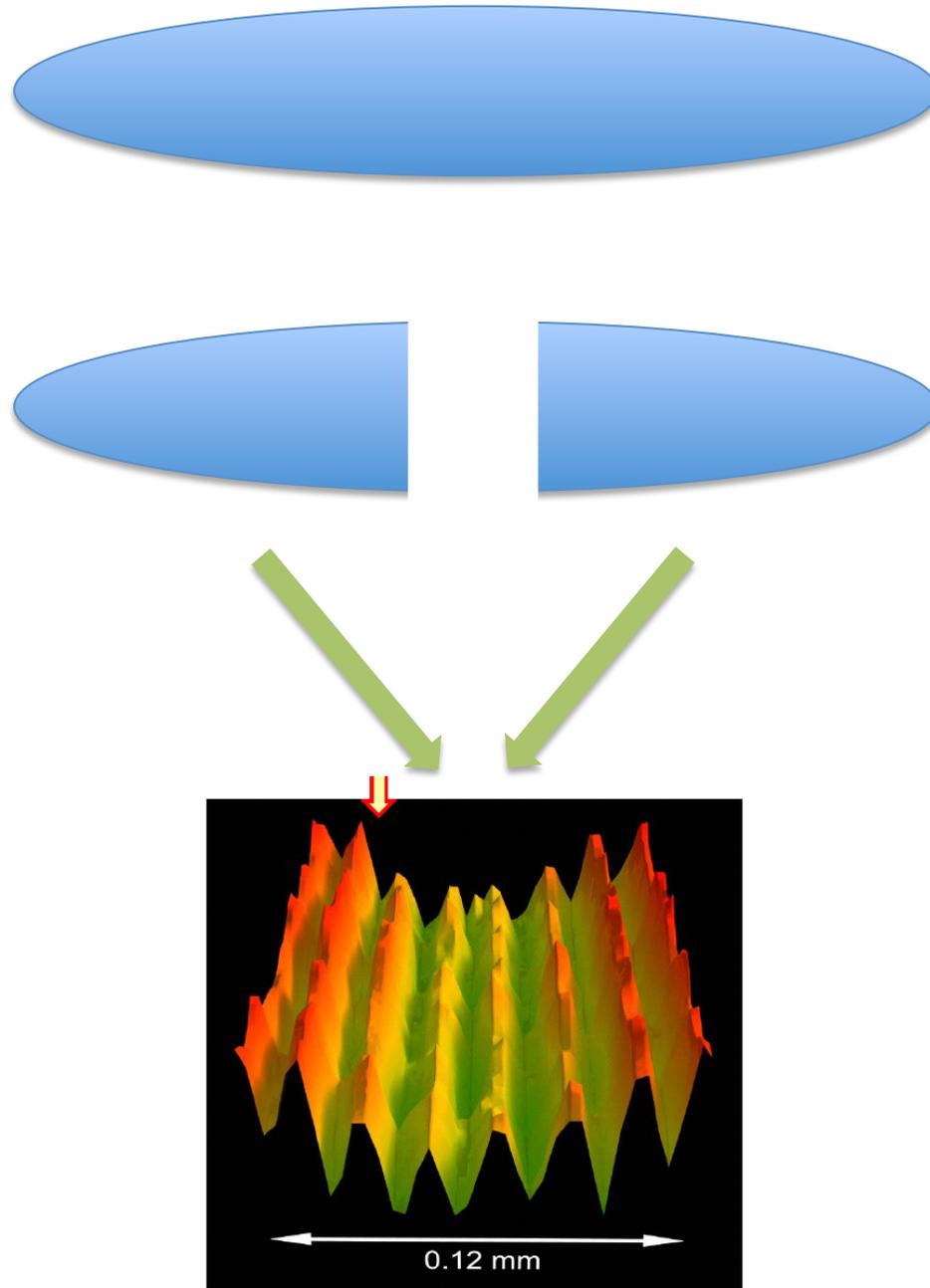
Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques



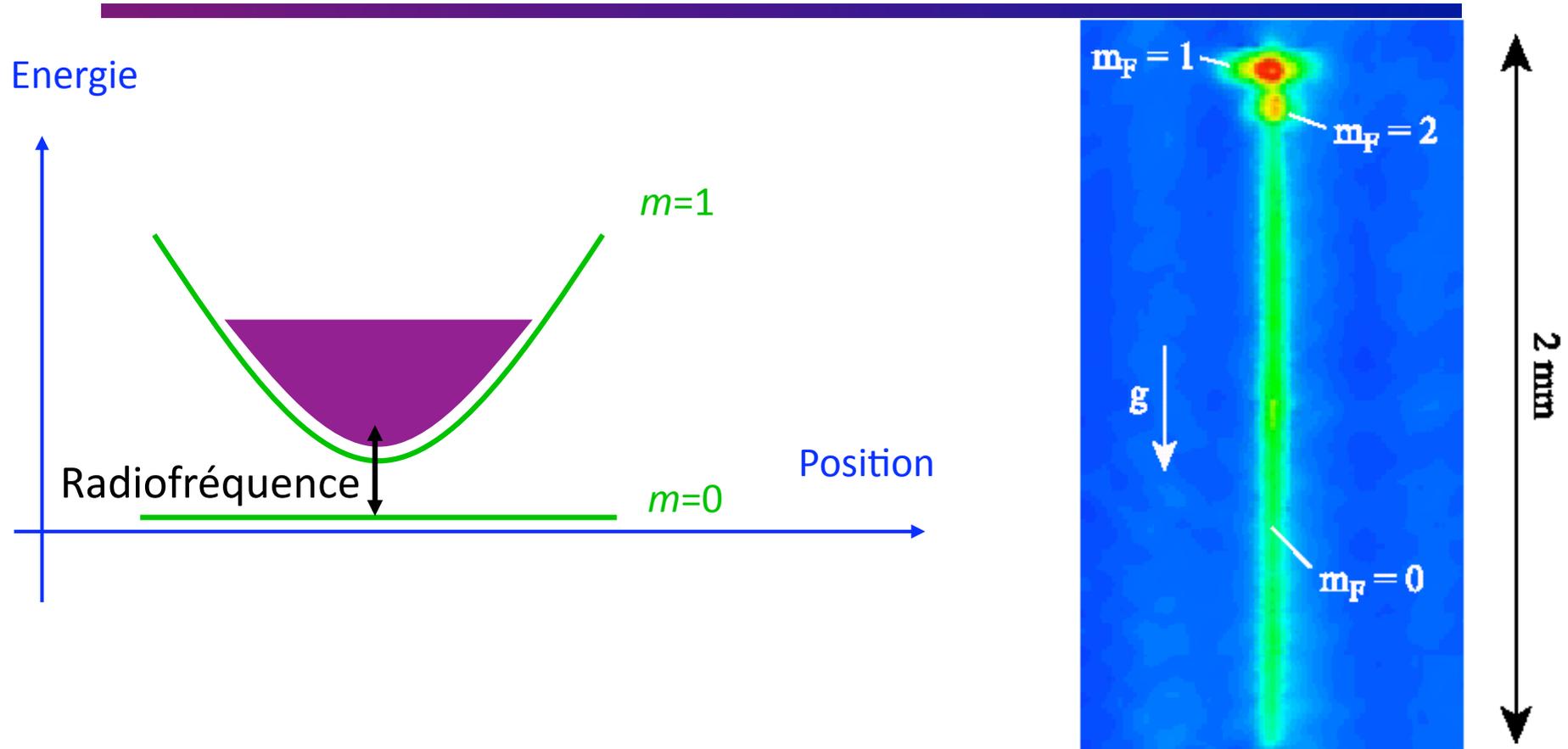
Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques



Faire interférer deux échantillons gazeux macroscopiques



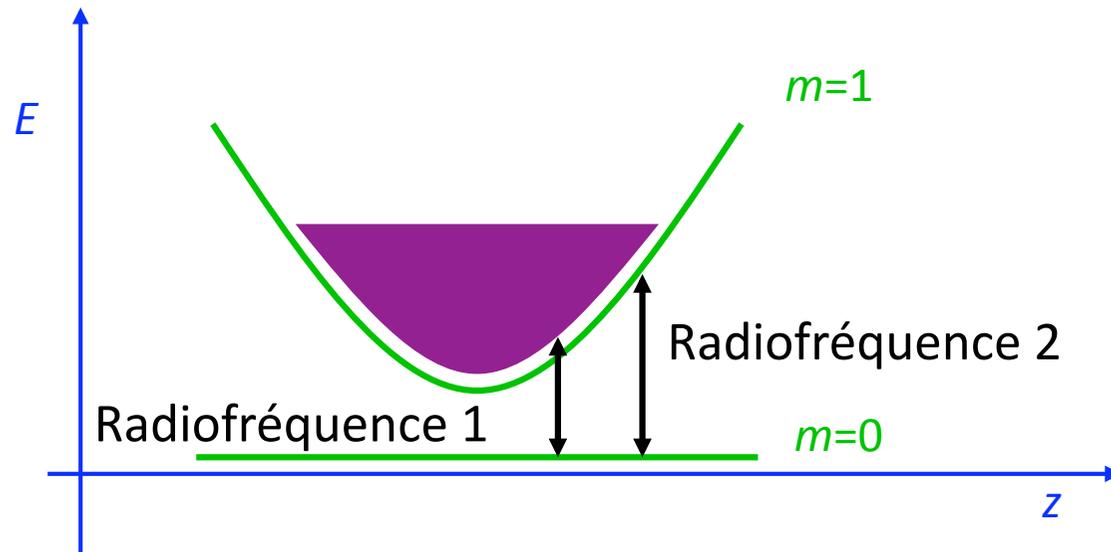
Extraction d'une onde de matière



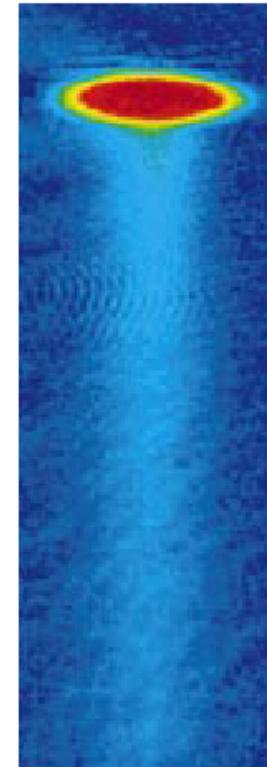
L'onde radio-fréquence fait basculer le moment magnétique des atomes situés au centre du piège magnétique, **elle est équivalente à une fente**

Expérience de type fentes d'Young

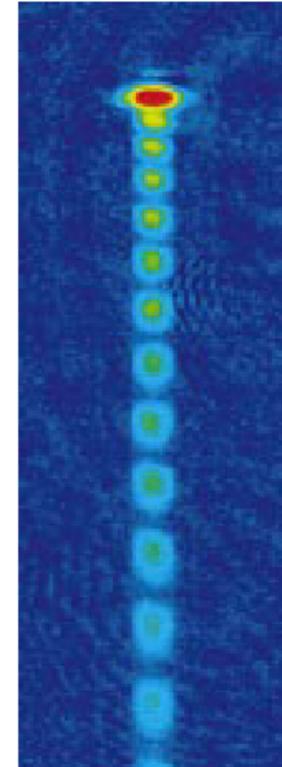
Expérience de type "fentes d'Young" = deux fentes



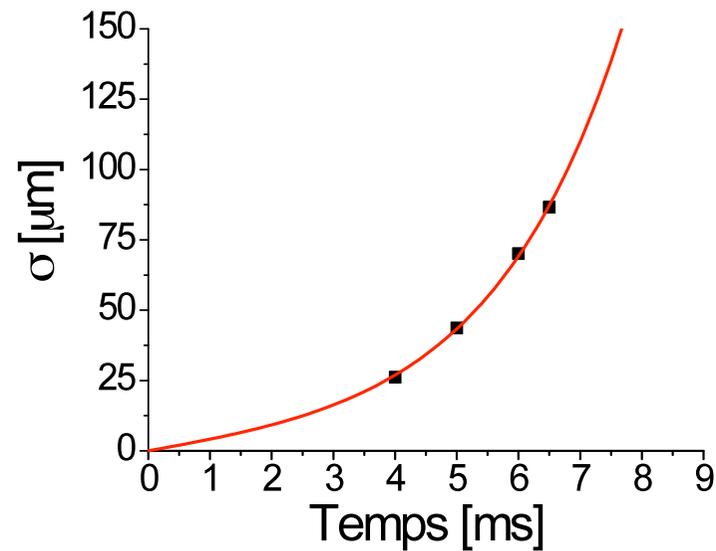
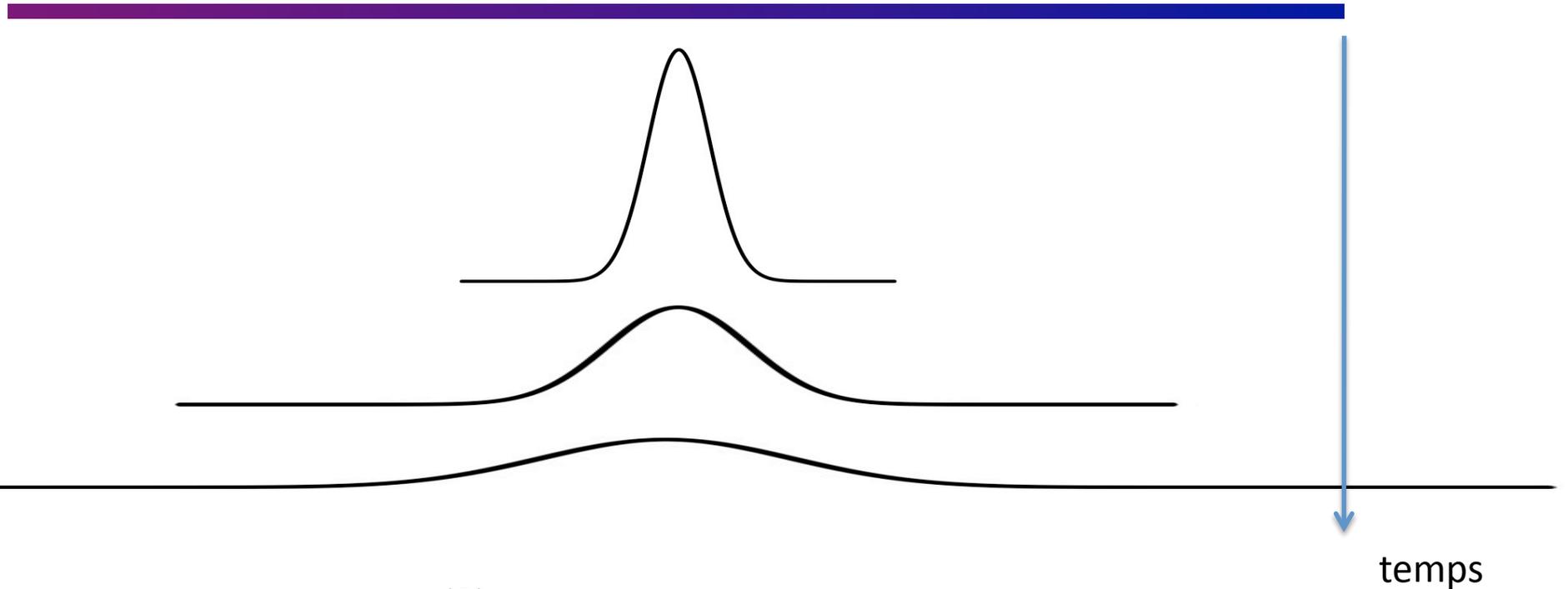
$T > T_c$



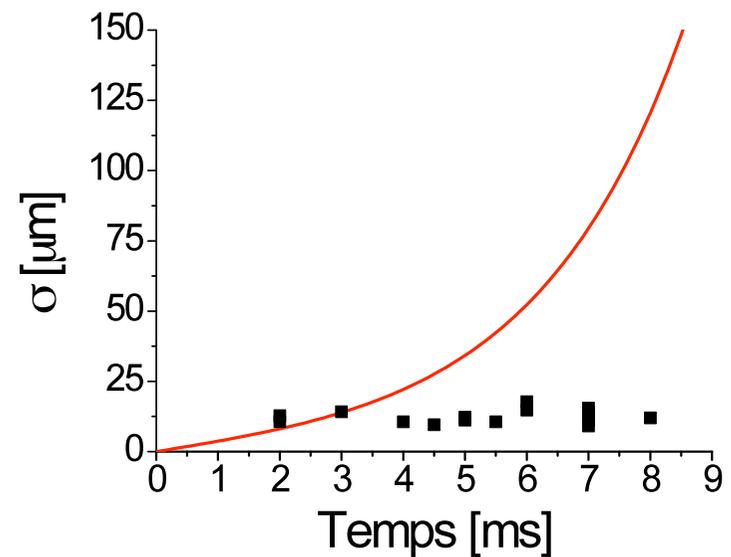
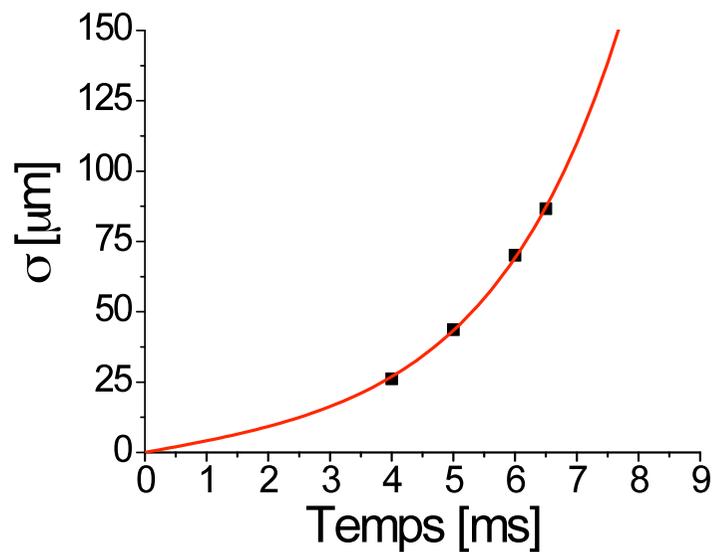
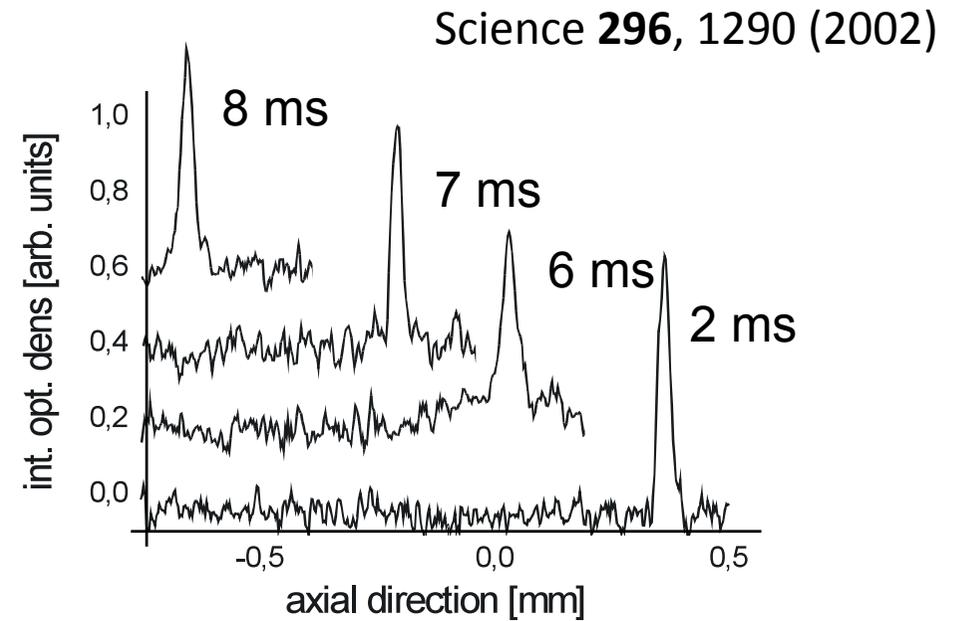
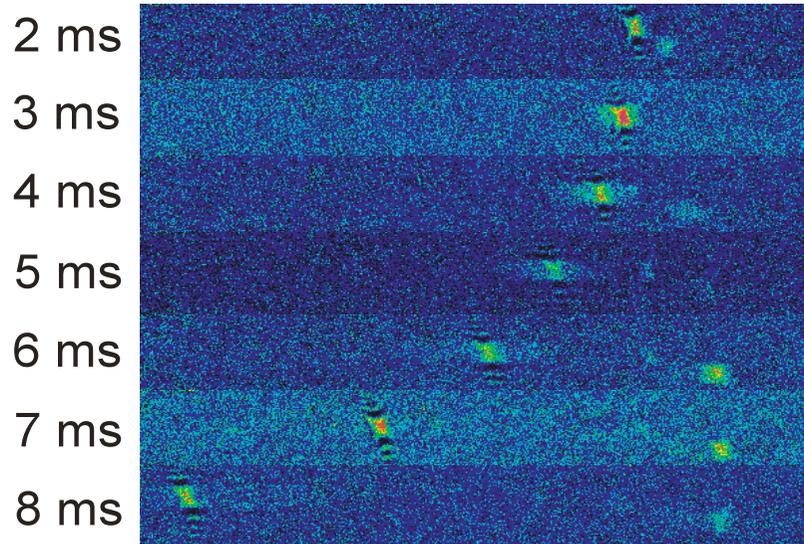
$T < T_c$



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

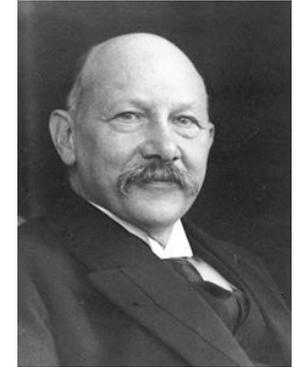


Interactions attractives = soliton de matière (1D)



Les basses températures: une histoire émaillée de surprises

1908 (Leiden): H. K. Onnes liquéfie
le gaz ^4He 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



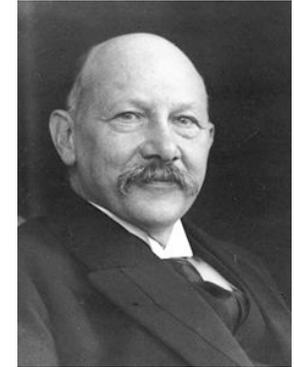
1927-1938 : en dessous de 2.17 K comportement
étrange disparition de la viscosité ?!!!, le liquide
ne bout plus ??!!!

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 ^4He 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/cm³

Hélium liquide : 10^{22} atomes/cm³

Gaz d'alcalins dilués : 10^{14} atomes/cm³

...

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. Nascimbène¹, N. Navon¹, K. J. Jiang¹, F. Chevy¹ & C. Salomon¹

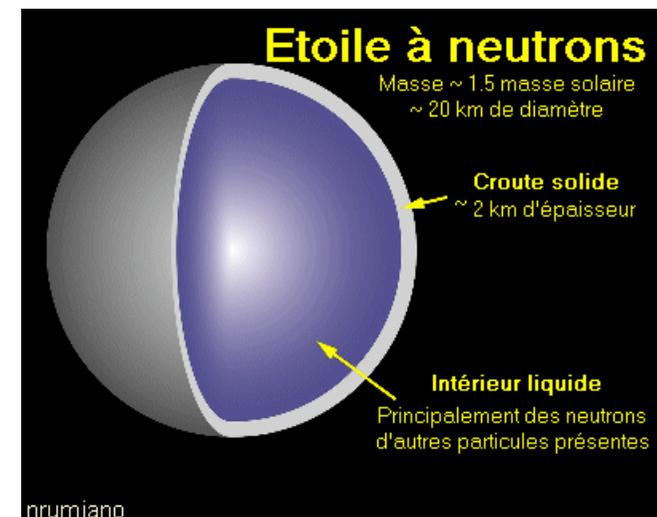
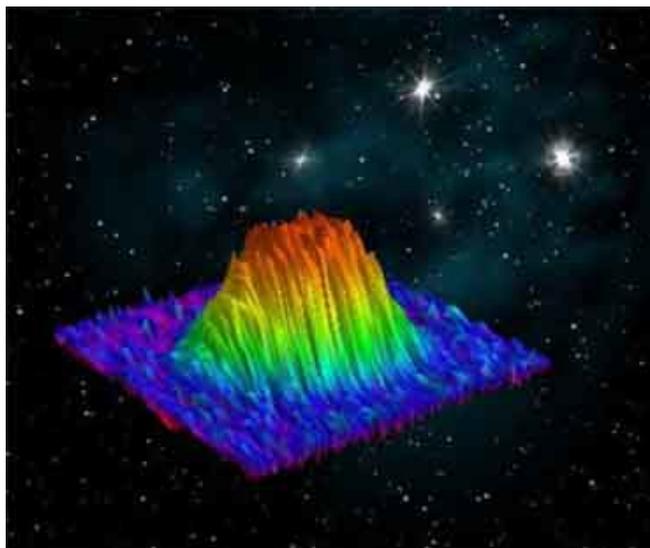
Nature **463**, 1057 (2010)

Gaz de fermions ultrafroids



gaz de neutrons (couche externe)

régime fortement corrélés



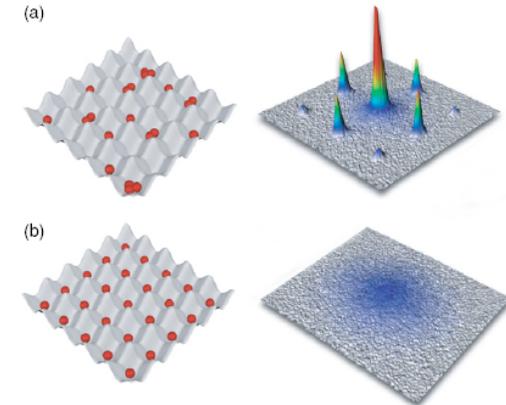
Autres exemples de simulateur quantique

Matière condensée : Transition métal-isolant

Nature **419**, 51 (2002)

Phase superfluide : délocalisation des atomes sur tout le réseau.

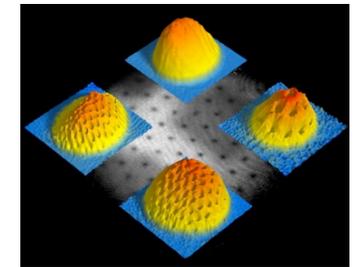
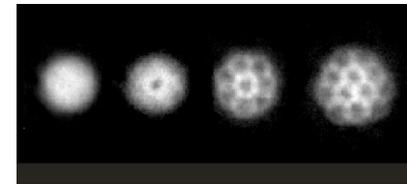
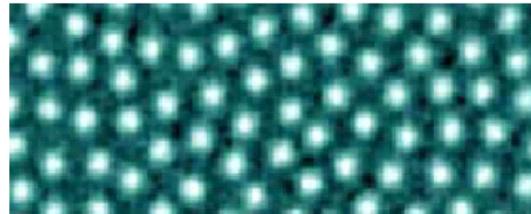
Phase isolante : les atomes sont localisés sur les sites du réseau.



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)

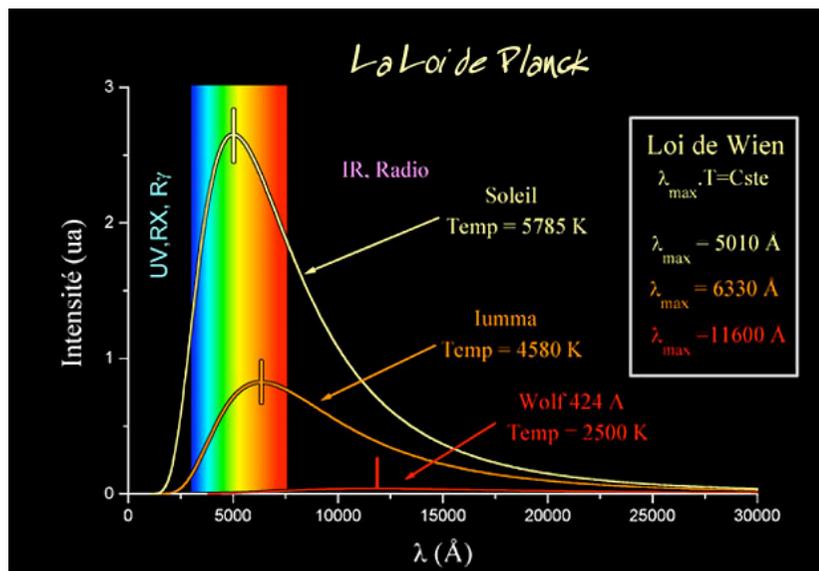
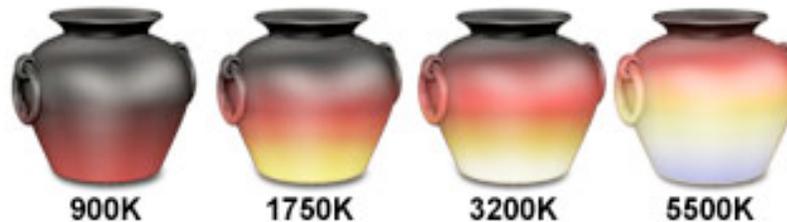
Paradoxe de Klein, même groupe *Physical Review Letters*, **106**, 060503 (2011)

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

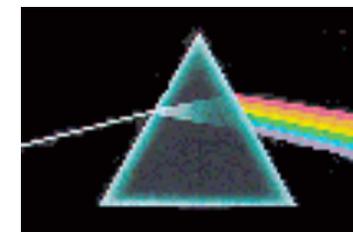
Emergence de la mécanique quantique à l'échelle macroscopique : un exemple de la vie courante

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).