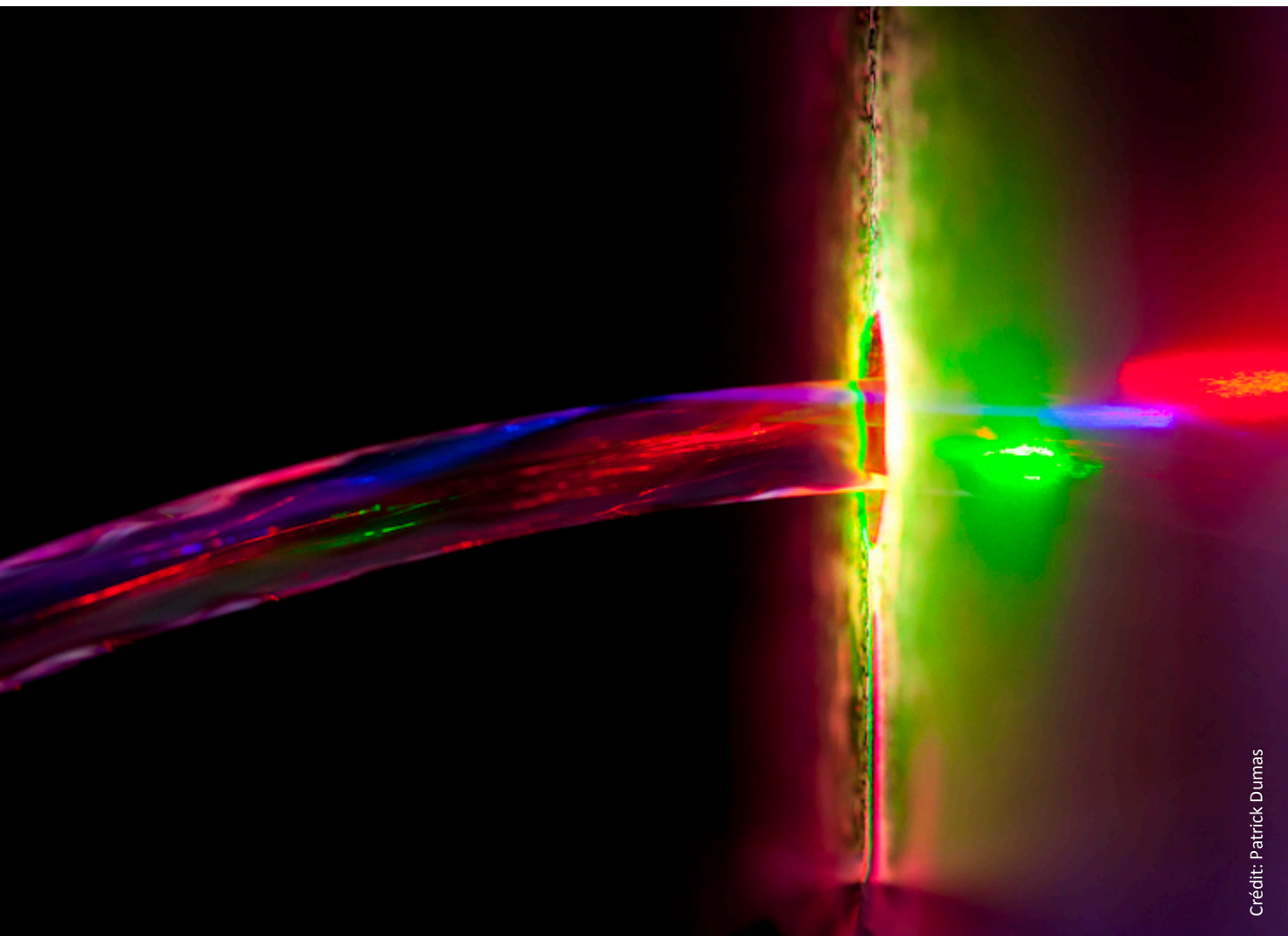


Journée d'accueil
« ondes lumineuses et ondes de matière »
au Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité
(Toulouse)



Crédit: Patrick Dumas



Organisation:
Juliette Billy

Programme

1. Introduction aux ondes lumineuses et ondes de matière

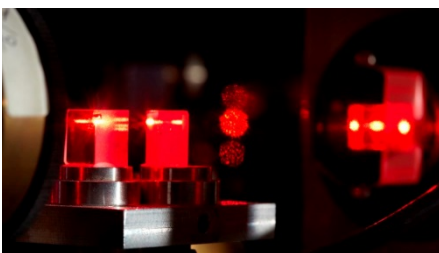
2. Visites d'expériences au laboratoire Collisions Agrégats Réactivité

- Expérience de l'équipe « Atomes froids »
- Expérience de l'équipe « Interférométrie atomique »
- Expérience de l'équipe « Femto »

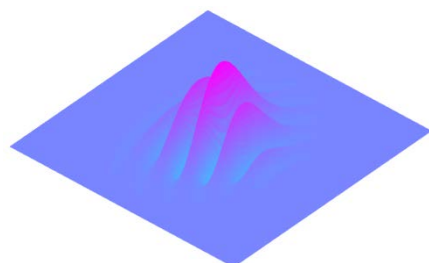
3. Atelier sur les interférences entre deux ondes lumineuses

4. Présentation parcours-métier

- Charlotte Fabre, enseignante en classe préparatoire au Lycée Déodat de Séverac
- Jean-Philippe Loisel, ingénieur au laboratoire Collisions Agrégats Réactivité
- Juliette Billy, maître de conférence de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier



Crédit: Patrick Dumas



Cette journée est organisée dans le cadre du projet PEPS-Egalité "Ondes de matière", avec le soutien du projet européen INTEGER (<http://www.projectinteger.com/en>) - GA n° 266638.

Ondes lumineuses

Onde lumineuse monochromatique

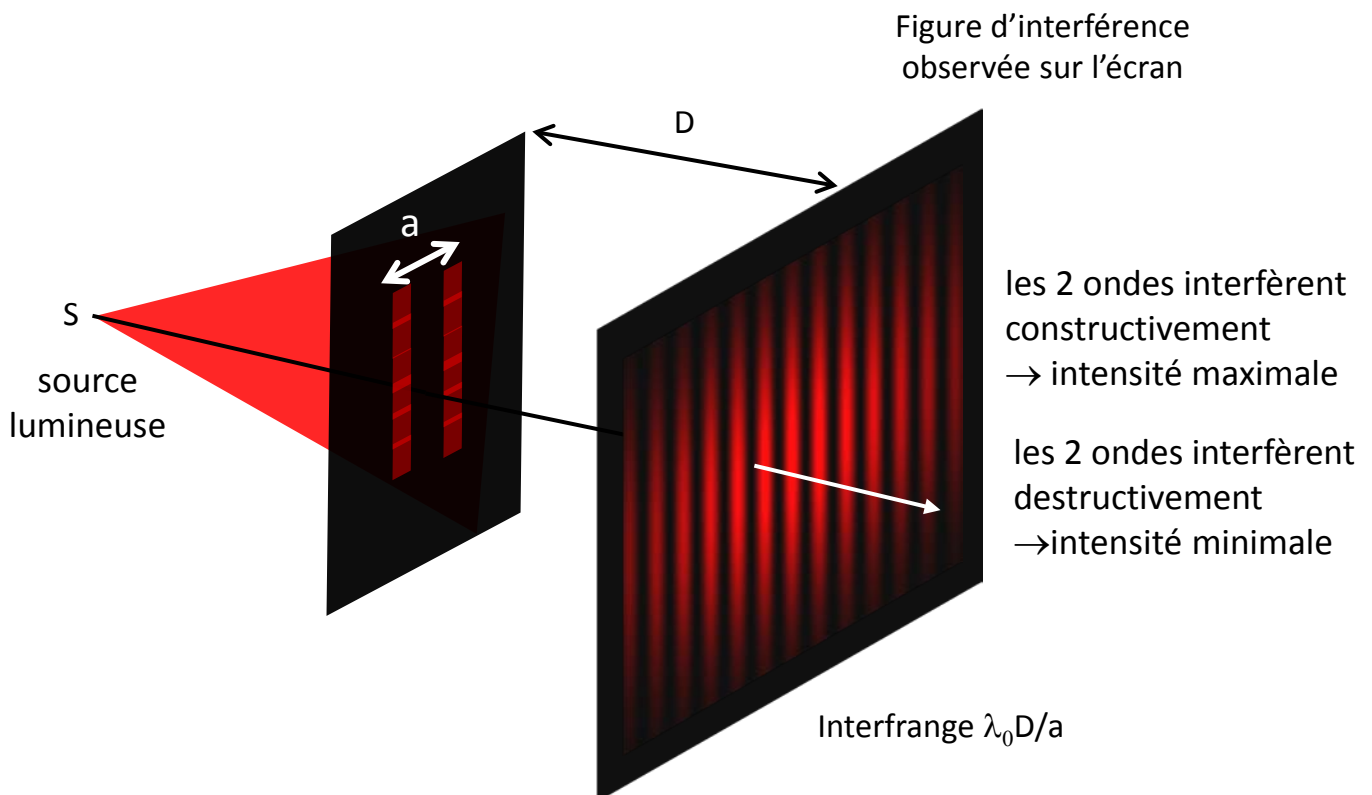
C'est une onde électromagnétique progressive sinusoïdale de fréquence ν donnée, de l'ordre de 500 THz (5×10^{14} Hz). Du fait de cette fréquence très élevée, il n'est pas possible d'observer la variation sinusoïdale de l'onde lumineuse; la quasi-totalité des détecteurs sont uniquement sensibles à son intensité. Une onde monochromatique est composée d'une seule radiation de longueur d'onde λ_0 dans le vide, comprise entre 400 nm (bleu) et 800 nm (rouge) pour une lumière visible .



La relation entre fréquence et longueur d'onde dans le vide est $\lambda_0 = c/\nu$ avec c la vitesse (ou célérité) de la lumière dans le vide ($c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Phénomènes caractéristiques des ondes: diffraction, interférences

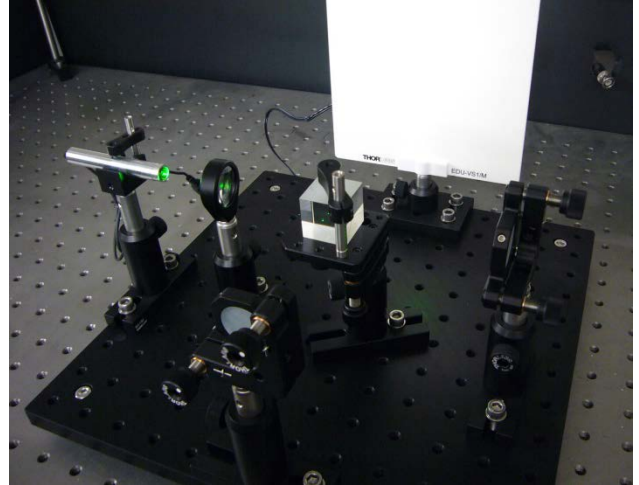
Exemple: dispositif interférentiel des fentes d'Young



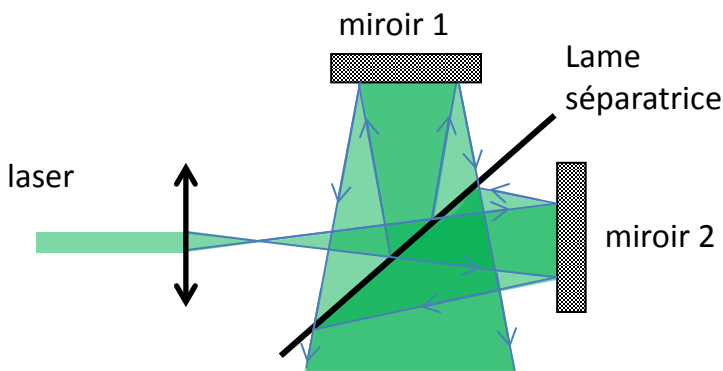
Atelier Interférences lumineuses

Interféromètre de Michelson

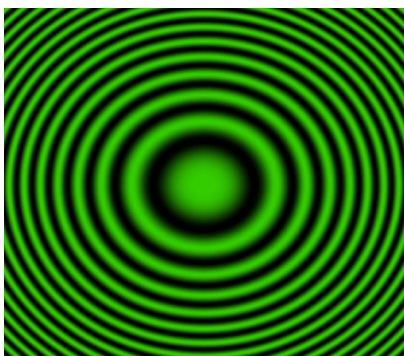
C'est un autre dispositif interférentiel. Comme dans le dispositif des fentes d'Young, deux ondes venant de la même source interfèrent. Les deux ondes sont obtenues en divisant l'onde initiale émise par la source en deux à l'aide d'une lame séparatrice. Cette lame permet également de recombinaison les deux ondes pour observer les interférences.



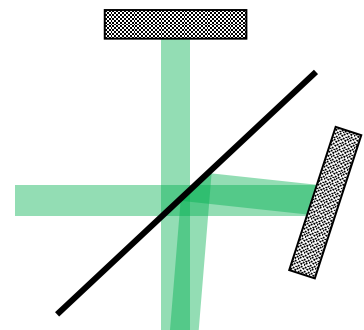
Anneaux



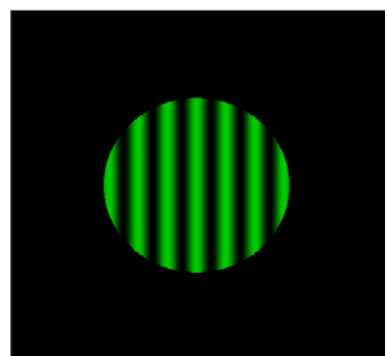
Les miroirs sont perpendiculaires entre eux. Les rayons lumineux ont des inclinaisons différentes. On observe des anneaux.



Franges rectilignes



Les miroirs ne sont pas parfaitement perpendiculaires et sont éclairés avec une source de rayons parallèles. On observe des franges rectilignes.



Photon ou « grain de lumière »

Plusieurs phénomènes inexplicables par le modèle ondulatoire de la lumière (effet photoélectrique, rayonnement du corps noir) ont mené à l'introduction d'un modèle particulaire de la lumière au début du 20^{ème} siècle et à la notion de photon.

Un photon est un grain d'énergie lumineuse, qui transporte une énergie quantifiée $E = h\nu$ avec $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s la constante de Planck et ν la fréquence du rayonnement électromagnétique associé. Il a une quantité de mouvement $p = h\nu / c$. C'est un objet quantique.

Interférence à un photon

Dans cette expérience, des chercheurs/euses ont réalisé un dispositif interférentiel similaire au dispositif des fentes d'Young qu'ils ont éclairé par une source émettant des photons un par un. Pour détecter les photons en sortie de l'interféromètre, ils/elles utilisent un système optique comprenant une caméra intensifiée.

Ils/elles observent la construction de franges d'interférences photon par photon. Les photons se comportent à la fois comme des particules (chaque photon correspond à un point lumineux sur la caméra) et comme une onde puisqu'il y a formation de franges d'interférence. Ces franges s'interprètent comme une alternance de zone où la probabilité de présence des photons est maximale ou minimale.

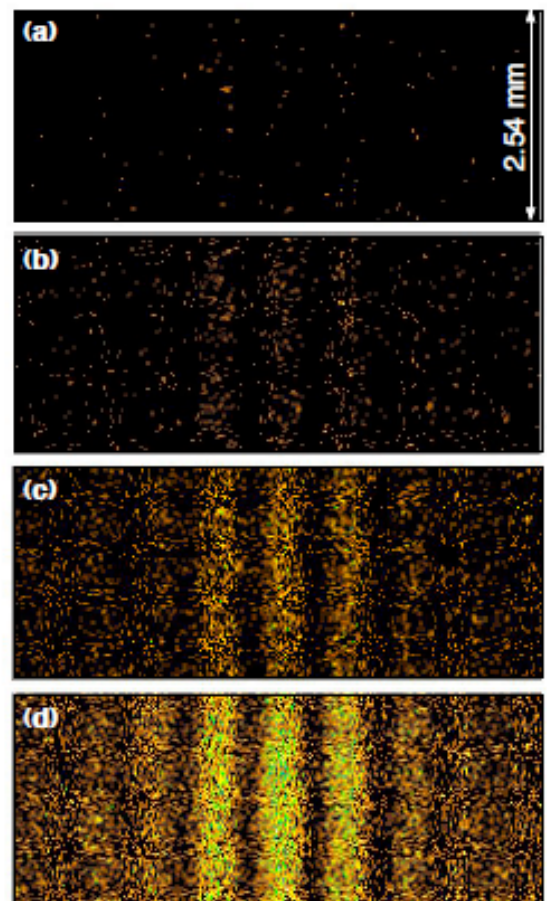


Figure tirée de la thèse de doctorat de Vincent Jacques (2007)

La lumière peut se comporter comme une onde et comme une particule.

Ondes de matière

Dualité onde-corpuscule pour la matière

De la même manière que la lumière peut se comporter comme une onde et comme une particule, à toute particule matérielle est associée une onde. Cette hypothèse formulée par Louis de Broglie en 1923 a été par la suite vérifiée. La double nature des particules est mise à profit dans de nombreuses expériences de physique de nos jours et constitue le concept de base de la physique quantique moderne.

La longueur d'onde λ_{DB} de l'onde associée à une particule matérielle, appelée longueur d'onde de de Broglie, vaut $\lambda_{DB} = h/p$ avec p la quantité de mouvement de la particule. Pour des particules non relativistes, de vitesse v faible devant la célérité de la lumière, $p = mv$ avec m la masse de la particule.

Exemples: onde atomique \leftrightarrow atome, onde électronique \leftrightarrow électron, etc.

Ordre de grandeur

Considérons des atomes de Rubidium (de masse m) que nous utilisons dans nos expériences au laboratoire. Leur vitesse étant reliée à leur température, on peut écrire la longueur d'onde de de Broglie thermique :

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

avec $m = 1,45 \times 10^{-25}$ kg la masse d'un atome et $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹ la constante de Boltzmann.

A température ambiante ($T = 300$ K), la vitesse moyenne des atomes est de l'ordre de 300 m/s et $\lambda_T = 10^{-11}$ m. λ_T étant très faible, le caractère ondulatoire ne se voit pas.

Lorsqu'on refroidit les atomes jusqu'à une température de 3 μ K, leur vitesse moyenne est de l'ordre de 30 mm/s et $\lambda_T = 0,1$ μ m. Il est alors possible d'observer le caractère ondulatoire des atomes.

Qu'est ce que la température ?

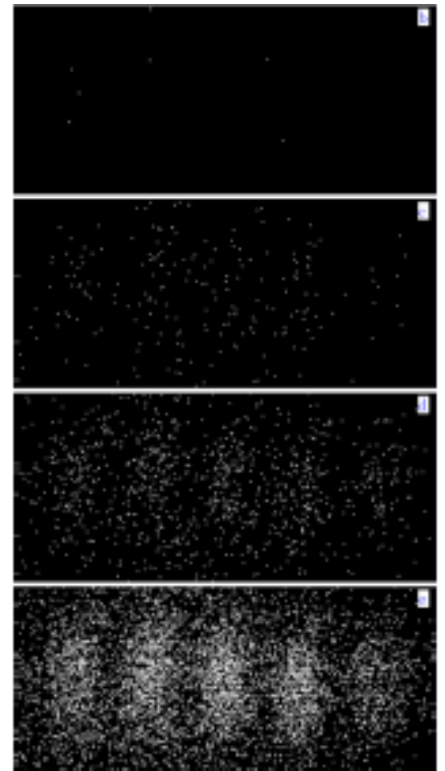
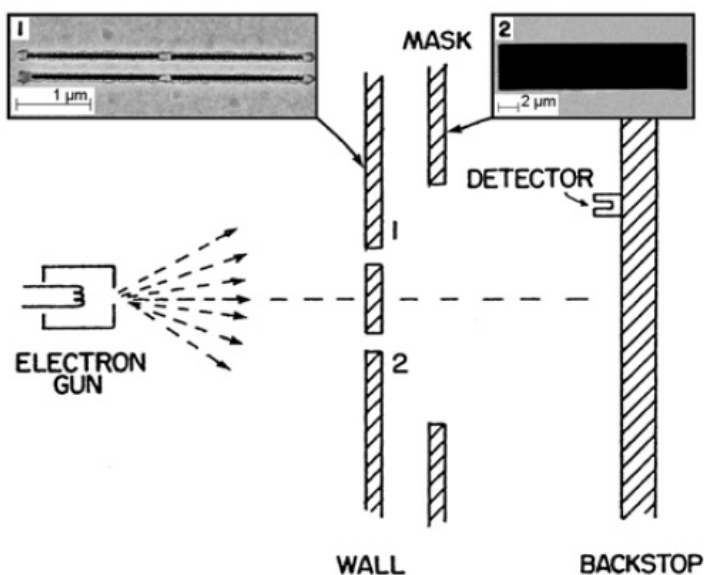
La température T mesure le degré d'agitation d'un ensemble de particules. Dans un gaz, elle caractérise la dispersion des vitesses des particules. Elle est reliée à l'énergie cinétique moyenne.

L'unité de la température est le kelvin (0 K = -273.15 °C)

Expériences d'interférence avec des particules matérielles

Interférences avec des électrons

Dans cette expérience, des chercheurs/euses ont réalisé un dispositif de fentes d'Young pour des électrons. Ils/elles observent les électrons arrivant un par un sur un détecteur et voient se construire la figure d'interférence, qui est la caractéristique d'une nature ondulatoire.

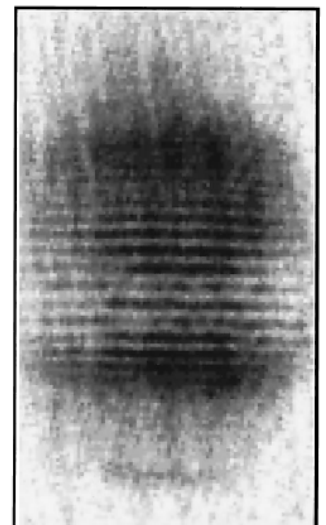


Figures tirées de R. Bach et al., *New Journal of Physics* **15**, 033018 (2013)

Interférences avec des atomes froids

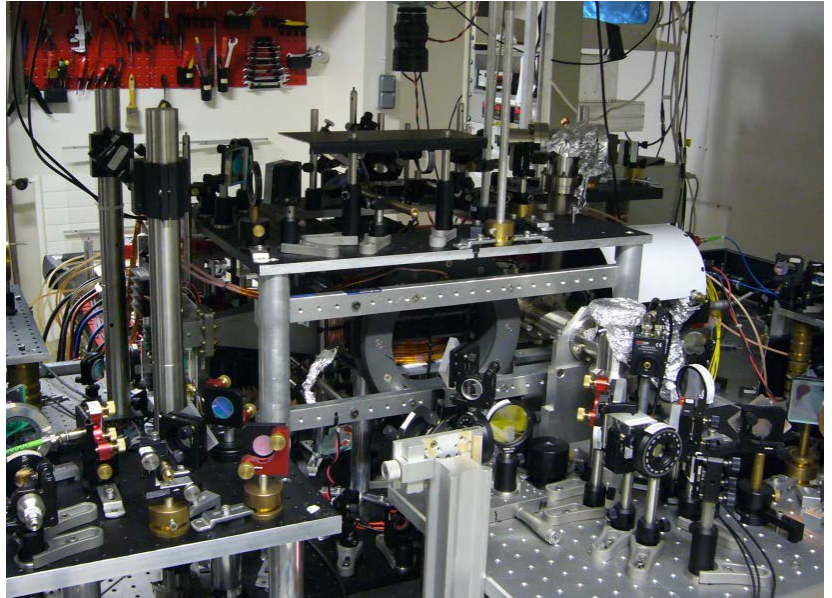
Des atomes refroidis à des températures de l'ordre de 100 nK se comportent comme des ondes. Ici tous les atomes se comportent de la même manière et forment une onde atomique « géante ». En divisant l'onde atomique en deux et en recombinaison les deux ondes, il est possible d'observer des interférences.

Image tirée de M.R. Andrews et al. *Science* **275**, 637 (1997)



Atomes ultra-froids / ondes atomiques ultra-froides

Dispositif pour obtenir des ondes de matière ultra-froides



Comment refroidir les atomes ?

1^{ère} étape: les atomes sont ralentis/refroidis à l'aide de faisceaux laser (cycles d'absorption et d'émission spontanée de photons par les atomes).

2^{ème} étape: les atomes sont piégés avec d'autres faisceaux laser. Ils sont refroidis par la méthode de refroidissement par évaporation («méthode de la soupe») en enlevant uniquement les atomes les plus énergétiques.

Avec cette méthode, il est possible d'atteindre des températures de l'ordre de 100 nK. A ces températures, un certain type d'atomes (les bosons) se comportent tous de la même manière et peuvent se comporter comme des ondes; ils forment ce qu'on appelle un condensat de Bose-Einstein, un nouvel état de la matière régi par les lois de la mécanique quantique.

Pour observer un ensemble d'atomes froids, on l'éclaire avec un faisceau laser et on regarde l'ombre créée par les atomes sur une caméra.

*Onde atomique se propageant dans un faisceau laser. Figure tirée de A. Couvert et al., EPL **83**, 50001 (2008)*

